

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

В.И.Бабий, М.В.Бабий

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, Капитанская, 2

Электрическая проводимость морской воды является важнейшим прямо измеряемым элементом состояния морской среды, посредством которого во всех современных СТД- гидрологических системах вычисляют (измеряют косвенным методом) соленость и плотность, являющиеся фундаментальными характеристиками в океанографии. Существуют два принципиально разных метода воспроизведения единицы удельной электрической проводимости (УЭП) морской воды:

- посредством образцовых растворов (нормальная морская вода, стандартные растворы солей КСl и т.п.);

- посредством установок высшей точности (УВТ) или эталонов УЭП.

Образцовые растворы используют, как правило, для измерения относительной электрической проводимости, а УВТ для измерения УЭП.

Главный недостаток существующих УВТ УЭП, реализованных на основе четырехэлектродных кондуктометрических ячеек переменного тока, состоит в присутствии им так называемых краевых эффектах электродов, приводящих к погрешностям. Ниже рассмотрен метод и устройства его реализующие, где эти погрешности устранены.

Возможны два варианта конструкции кондуктометрической ячейки: с постоянными параметрами и переменными параметрами. В ячейке с постоянными параметрами краевые эффекты неустранимы, тогда как в ячейке с переменными параметрами их можно исключить.

Рассматриваемый способ измерения основан на физическом определении УЭП проводящих

сред:

$$\rho = \frac{l}{R \cdot S} \left[\frac{C_M}{M} \right], \quad (1)$$

где ρ - УЭП, R - удельное электрическое сопротивление, l - геометрическая длина проводника постоянного поперечного сечения S . Суть метода состоит в том, что в исследуемой проводящей жидкости (электролите, морской воде и т.п.) возбуждают электрический ток постоянной плотности в рабочем объеме ячейки и измеряют электрическое сопротивление R рабочего участка. Затем в рабочий участок жидкости помещают (вводят) диэлектрическое тело (стержень) постоянного поперечного сечения S и

измеряют изменение сопротивления R , а УЭП рассчитывают по выражению

$$\rho_e = \frac{1}{S} \cdot \frac{l_2 - l_1}{R_2 - R_1} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta R}, \quad (2)$$

где l_1 и l_2 - начальное и конечное положения торца диэлектрического стержня на рабочем участке, R_1 и R_2 - начальное и конечное значения электрического сопротивления жидкости. Рис.1 иллюстрирует суть метода. Диэлектрический стержень l постоянного поперечного сечения S в исследуемой жидкости перемещается на величину l поступательно вдоль оси рабочего участка длиной L и сечением S_1 кондуктометрической ячейки 3. Зависимость сопротивления R от положения торца стержня l на рабочем участке L ячейки представлена на графике снизу. Здесь L - расстояние между потенциальными электродами кондуктометрической ячейки. Область "а" соответствует случаю, когда стержень l полностью выведен из рабочего участка L , при этом $R=R_{min}$, что соответствует случаю кондуктометрической ячейки с постоянными параметрами L и S_1 . Область "б" соответствует началу введения торца стержня l в рабочий участок L . В этой области проявляется краевой эффект, обусловленный неравномерностью эквипотенциальных линий вблизи торца стержня. В области "в" приращение сопротивления ΔR прямопропорционально приращению перемещения стержня вдоль оси ячейки (зависимость $R(x)$ описывается прямой линией, проходящей под углом α к оси x). При приближении торца стержня к концу рабочего участка L снова наблюдается краевой эффект (область "г"). При полностью вдвинутом стержне в области "д" сопротивление рабочего участка $R=R_{max}$, что соответствует случаю кондуктометрической ячейки с постоянными L и S_1-S . В линейной области "в" влияние краевых эффектов отсутствует и УЭП рассчитывают по формуле (2). Погрешность воспроизведения ρ_e может быть уменьшена посредством статистического осреднения результатов измерений двумя путями:

- проведением серии измерений с использованием диэлектрических стержней различного сечения S ;
- аналитической линейной аппроксимацией (например, методом наименьших квадратов) экспериментальной зависимости R от l в области "в", где $\text{tg } \alpha = \Delta R / \Delta l$.

Относительная погрешность единичного измерения УЭП определяется путем дифференцирования выражения (2):

$$\frac{\delta \rho_e}{\rho_e} = \frac{\delta(\Delta l)}{\Delta l} - \frac{\delta S}{S} - \frac{\delta(\Delta R)}{\Delta R}, \quad (3)$$

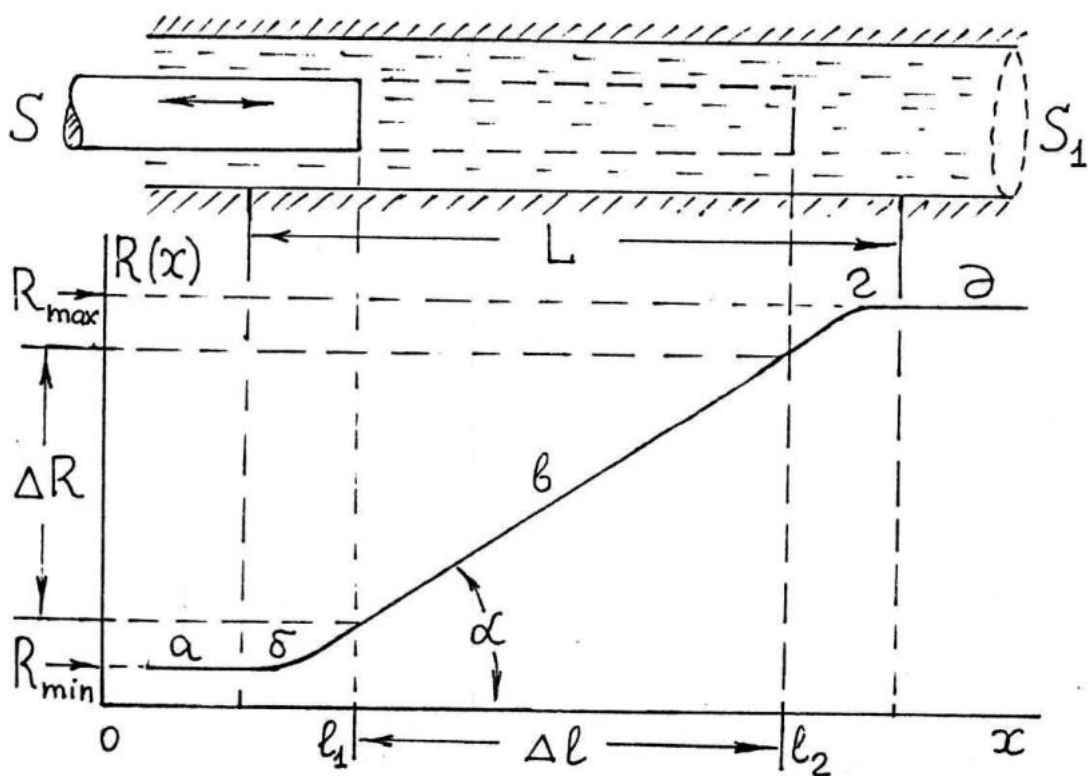


Рис.1. Схема рабочего участка кондуктометрической ячейки и зависимость $R(x)$.

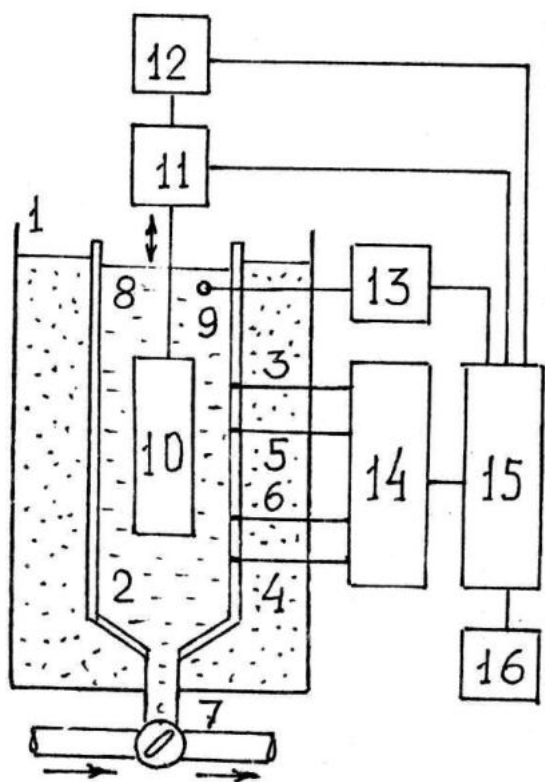


Рис.2. Структура электродного УВП УЭП.

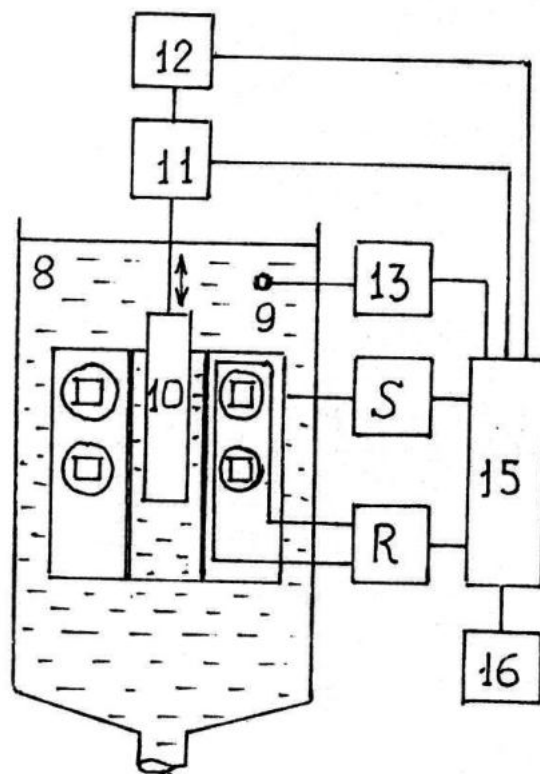


Рис.3. Структура индуктивного УВП УЭП.

где символ $\delta(\)$ обозначает погрешности измерения соответствующих величин. Как видим, суммарная инструментальная погрешность содержит две составляющие - геометрическую (длины и сечения) и электрическую (сопротивление).

Оценим возможный порядок величин, входящих в выражение (3). Пусть диэлектрический стержень круглого сечения имеет диаметр $d=0.01$ м, а перемещение $\Delta l=0.05$ м. Погрешность измерения геометрических размеров современными лазерными интерферометрами оценивается величиной $\delta d = \delta(\Delta l) \leq 5 \cdot 10^{-8}$ м. Относительная погрешность измерения сопротивления R на уровне рабочих эталонов составляет $\delta(\Delta R) / \Delta R \leq 1 \cdot 10^{-6}$. Здесь преобладающей является "геометрическая" составляющая, обусловленная неточностью определения S . Подставляя эти значения в (3) и суммируя их модули, получим оценку предельной погрешности $|\delta e / e| \leq 1 \cdot 10^{-5}$. Эта оценка на порядок меньше существующих погрешностей воспроизведения единиц УЭП жидкостей. Так стандартный раствор KCl имеет относительную погрешность УЭП $(3 \div 5) \cdot 10^{-4}$, а эталон УЭП не менее $1 \cdot 10^{-4}$.

Устройство для измерения УЭП, реализующее данный метод, схематически изображено на рис.2. Оно содержит термостат 1, в камеру которого в масляной ванне помещена четырехэлектродная кондуктометрическая ячейка 2, содержащая токовые 3,4 и потенциальные 5,6 электроды. Расстояние между потенциальными электродами обозначим L . Диаметр внутреннего канала ячейки D . Снизу ячейки 2 расположен трехходовой кран 7, служащий для наполнения ячейки, слива жидкости из ячейки и разобщения содержимого ячейки от внешних трубопроводов. В верхней части ячейки расположена расширительная камера 8. Ячейка оснащена датчиком температуры 9, например платиновым термометром сопротивления. В кондуктометрической ячейке коаксиально рабочему участку канала размещен диэлектрический стержень 10 круглого сечения диаметром d , выполненный из ситалла или кварцевого стекла. Геометрические размеры стержня (его S и d) метрологически аттестованы. Стержень 10 соединен с измерителем перемещений 11, например, лазерным интерферометром. Реверсивный привод 12 (электрический, гидравлический) соединен со стержнем 10 и поступательно перемещает его в канале ячейки вдоль ее оси. Электроды ячейки соединены со входом электрического моста 14 (типа [1]), выход которого через интерфейс соединен с вычислителем 15, например, персональным компьютером с внешними устройствами 16. К вычислителю 15 подключены также измеритель температуры 13 с датчиком 9, измеритель пере-

мещений 11 и схема управления реверсивным приводом 12. Величину УЭП вычислитель 15 рассчитывает по алгоритму (2), выделяя из массива исходных данных линейный участок зависимости $R(x)$ и определяя $\text{tg} \alpha$ методом наименьших квадратов. Для уменьшения случайной составляющей погрешности процесс измерения ∂e повторяется многократно.

На рис.3 показан вариант воспроизведения единицы УЭП неконтактным индуктивным способом. Суть его состоит в возбуждении в замкнутом витке жидкости переменного тока посредством кольцевого магнитопровода с тороидальной обмоткой подобно известным индуктивным солемерам. Передающий и приемный магнитопроводы солемера охвачены петлей проводника, подключенного к образцовым мерам сопротивления R . Во внутреннюю полость (трубку) индуктивного датчика солемера вводится диэлектрический стержень, а изменение проводимости участка жидкости компенсируется изменением R . Таким образом солемер используется как индикатор баланса при замещении сопротивлением R изменения проводимости участка жидкости. В этом случае требования к нелинейности и долговременной стабильности индуктивного солемера снижаются. Расчет ∂e также проводят по формуле (2). Преимущества неконтактного способа измерения УЭП состоят в отсутствии приэлектродных процессов, т.е. в сохранении известных достоинств, присущих индуктивным солемерам. Напомним, что ∂e - величина комплексная, поэтому для ее измерения надо компенсировать как активную, так и реактивную составляющие сопротивления.

Предложенный метод и устройства его реализующие позволяют существенно повысить точность воспроизведения единицы удельной электрической проводимости морской воды (электролитов) при создании новой эталонной базы в составе комплексных гидрофизических метрологических стендов, разрабатываемых в рамках проекта "Метрология" [2] для метрологического обеспечения морских исследований и работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сурду М.Н., Михаль А.А., Швец Т.В. Прецизионный автоматический кондуктометрический мост для измерения удельной электропроводности морской воды. - Международный научно-технический семинар "Морское и экологическое приборостроение", - Сборник трудов. - Севастополь, 1995, с.12-13.
2. Бабий В.И., Гайский В.А., Забурдаев В.И. Метрологическое обеспечение морских исследований и работ, проект "Метрология". - Международный научно-технический семинар "Морское и экологическое приборостроение", - Сборник трудов. Севастополь, 1994, с.88-90.