

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ *in situ*

В.А. Гайский

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

*Рассматриваются возможные технические решения для измерения удельной электрической проводимости морской воды *in situ**

Удельная электрическая проводимость (УЭП) морской воды широко используется для определения солености и далее для оценки термодинамического состояния морской воды [1]. Так, все используемые в океанологии СТД-зонды измеряют *in situ* электрическую проводимость воды G в некоторой проточной ячейке (датчике) [2], которая обычно связана с УЭП χ через кондуктивную постоянную A выражением

$$\chi = AG. \quad (1)$$

Для абсолютного измерения УЭП необходимо, чтобы A однозначно определялась геометрическими размерами измерительной ячейки, которые можно было бы достаточно точно измерить и контролировать при разных температурах и давлениях в диапазонах применения прибора. Наиболее точно кондуктивная постоянная измерительной ячейки контролируется в лабораторных приборах (солемерах) при замене морской воды «нормальной» морской водой той же температуры и при неизменном давлении [2-3]. Однако такие измерители имеют низкую производительность из-за необходимости попеременного анализа проб исследуемой и «нормальной» морской воды с приведением их и измерителя к одинаковой температуре, обладают ограниченной точностью из-за косвенного способа определения удельной электропроводности и не пригодны для работы непосредственно в среде или встроенными на проток морской воды.

Известны различные измерители удельной электропроводности жидкостей [2-5]. В некоторых из них кондуктивная постоянная ячеек определяется только одним из геометрических размеров ячейки. Такие ячей-

ки предложены Ван дер Пау [4] (рис. 1а) и Лэмпардом (рис.1б) [5]. Для них теоретически соответственно

$$A = \frac{\ell n 2}{\pi d} \quad (\text{при } d \rightarrow 0) \quad (2)$$

$$\text{и} \quad A = \frac{\pi}{d \ln(2)} \quad (\text{при } d \rightarrow \infty), \quad (3)$$

где d – высота ячеек, показанных на рис. 1 в сечениях.

В 1990-х годах в НПО «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» на базе развития этих ячеек разрабатывался лабораторный эталон удельной электрической проводимости жидкостей с относительной погрешностью кондуктивной постоянной до 10^{-5} . В измерителе использовалась ячейка Хажуева В.Н. [6]. Однако использование таких измерительных ячеек в СТД-зондах остается не ясным.

Рассмотрим широко используемые в СТД-зондах датчики электропроводности.

На рис. 2 показан трехэлектродный датчик электропроводности, в котором рабочий объем жидкости находится только внутри трубки благодаря тому, что на два крайних электрода 1 и 2 подан один и тот же потенциал питания, а другой потенциал подан на средний электрод 3. Электропроводность (или сопротивление) ячейки может измеряться в режиме заданного напряжения U_0 по току I или в режиме заданного тока I_0 по напряжению U . При этом сопротивление приэлектродных слоев жидкости непосредственно входит в измеренное сопротивление ячейки.

Поскольку из-за электрохимических процессов на электродах сопротивление и толщина приэлектродных слоев нестабильны, то точность измерения сопротивления ячейки и рабочих расстояний между электродами l_{13} и l_{23} ограничена.

Можно показать, что кондуктивная постоянная трехэлектродного датчика на рис. 2 приближенно равна

$$A \approx \frac{l_{13} l_{23}}{l_{13} S_1 + l_{23} S_2} \quad (4)$$

$$\text{или} \quad A \approx \frac{l}{2S},$$

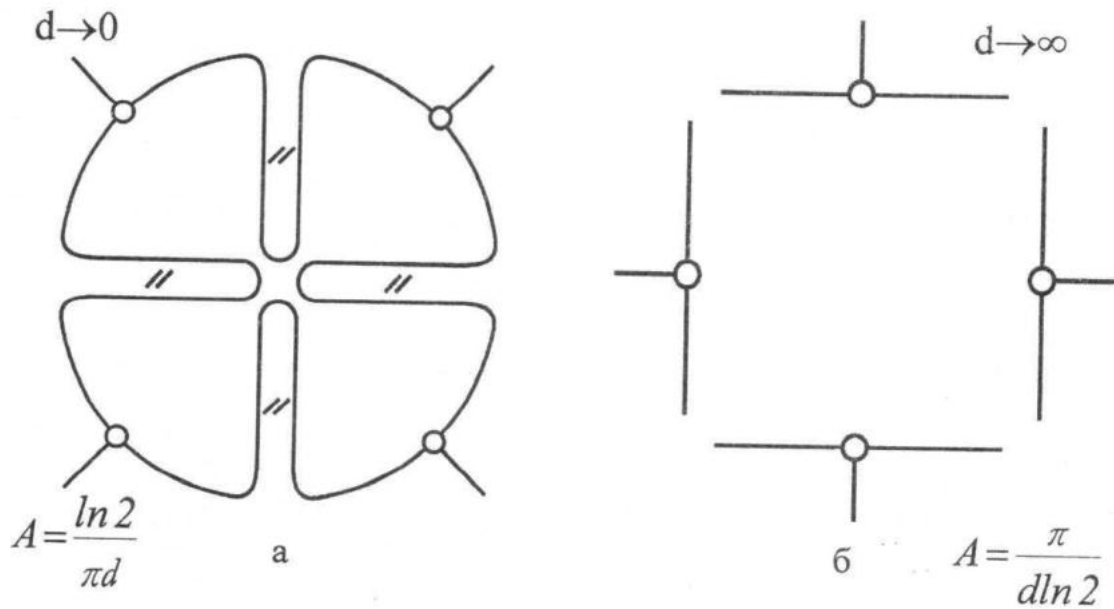


Рис. 1 - Измерительные ячейки Ван дер Пау (а) и Лемпарда (б)

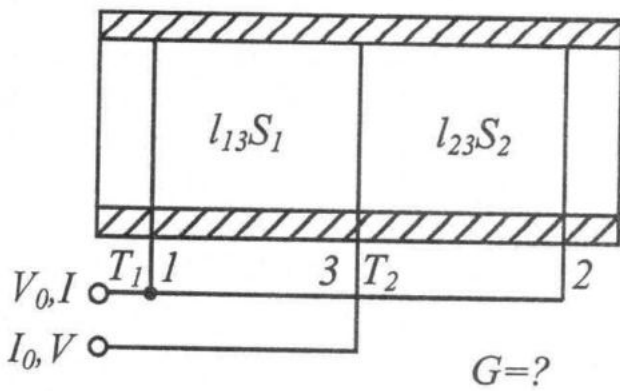


Рис. 2 - Трехэлектродный датчик электропроводности

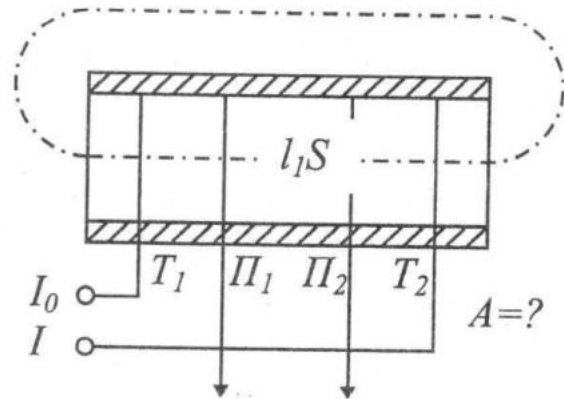


Рис. 3 - Четырехэлектродный датчик электропроводности

$$A \Big|_{\Delta G} = \frac{l_0 S_0}{S(S - S_0)}$$

$$A \Big|_{\Delta G} = \frac{\Delta l}{S_0}$$

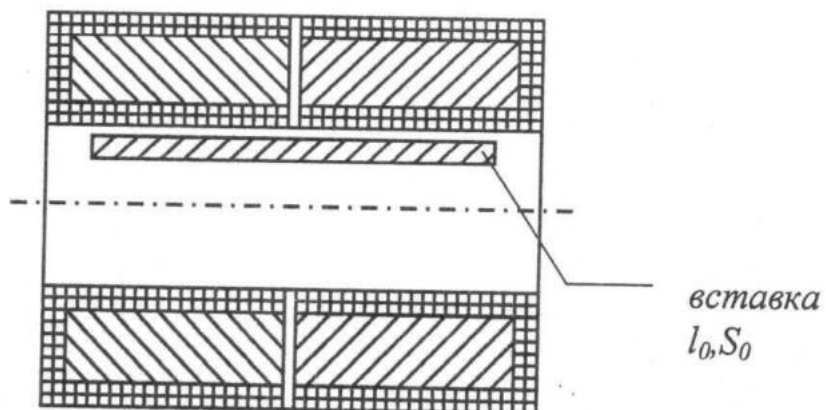


Рис. 4 - Двухтрансформаторный датчик электропроводности

$$\text{если } l_{13} = l_{23} = l, \quad S_1 = S_2. \quad (5)$$

Отрицательное влияние приэлектродных слоев на результат измерения сопротивления (электропроводности) ячейки устраняется в датчике с двумя токовыми (T_1 и T_2) и двумя потенциальными (Π_1 и Π_2) электродами в трубке, показанном на рис.3 [7].

Датчик может опрашиваться в режиме заданного тока I_0 , когда измеряется напряжение U , на потенциальных электродах, или в режиме заданного на потенциальных электродах напряжения U_0 , когда измеряется ток I через токовые электроды.

Если датчик открыт, то рабочий объем датчика не фиксирован и между токовыми электродами часть тока (неконтролируемая) течет во внешней среде, вне области потенциальных электродов. Эта часть тока может быть сделана малой, например, за счет удлинения трубки и внесения внешнего ограждения. Однако для открытого датчика кондуктивная постоянная A не может быть определена из геометрических размеров. Если же электроды расположены в изолированной от внешней среды трубке (бесконечно длинной трубке или в системе с отбором проб), то тогда

$$\chi = \frac{I}{U} A, \quad \text{причем } A = \frac{l}{S}, \quad (6)$$

где I - ток между токовыми электродами,

U - напряжение между потенциальными электродами,

l - расстояние между потенциальными электродами,

S - площадь сечения трубки между потенциальными электродами.

Таким образом, открытый четырехэлектродный датчик (рис. 3) не пригоден для точных измерений УЭП *in situ* из-за неопределенности A .

Широко используются индуктивные датчики электропроводности с двумя тороидальными трансформаторами, жидкостным витком связи между ними и компенсационной схемой включения [8]. Схема такого датчика показана на рис. 4. В таких датчиках большая часть электрического

сопротивления жидкостного витка связи сосредоточена внутри трубки с известным сечением S и длиной l . Однако другая часть витка связи захватывает с разным весом в принципе бесконечный объем пространства вокруг датчика, в который попадают ограждение датчика, корпус прибора и исследуемая среда с неоднородной и нестационарной удельной электропроводностью. "Геометрическая постоянная" для такого датчика вообще не может быть постоянной. Здесь можно говорить только о некоторой средней величине A с некоторой приемлемой погрешностью. Например, датчики (каналы) электропроводности в приборах АЦИТ ААНИИ в 1960-х годах градуировались по методике калиброванных вкладышей во внутреннюю трубку и измерением изменения электропроводности ΔG без и с наличием вкладыша [9].

Кондуктивная постоянная индуктивного двухтрансформаторного датчика при этом соответствует формуле

$$A|_{\Delta G} = \frac{l_0 S_0}{S(S - S_0)}, \quad (7)$$

где l_0, S_0 - размеры вкладыша;

S - площадь поперечного сечения внутренней трубки;

ΔG - изменение проводимости витка при внесении вкладыша.

При этом $\chi = \Delta G A$. (8)

Если перемещение вкладыша легче точно измерять, чем линейные размеры и для исключения краевых эффектов, в [10] предлагается перемещать вкладыши и фиксировать только перемещение Δl и изменение электропроводности ΔG при этом.

В этом случае

$$A|_{\Delta l} = \frac{\Delta l}{S_0} \quad (9)$$

Ни один из этих способов калибровки индуктивных трансформаторных датчиков электропроводности не представляется реализуемым при измерениях *in situ*.

Задача может быть решена использованием двух разных стационарных калиброванных вкладышей в контактном датчике электропроводности с тремя токовыми и пятью потенциальными электродами [11].

Структурная схема устройства представлена на рис. 5. В состав измерителя электропроводности жидкости входят восьмиелектродная измерительная ячейка 1 и блок регистрации 2.

Измерительная ячейка 1 выполнена в виде цилиндрической трубки 3 из диэлектрического материала, внутри которой на фиксированных расстояниях расположены сеточные токовые электроды 4, 5 и 6 и точечные потенциальные электроды 7, 8, 9, 10, 11. Выполнение токовых электродов в виде сеток необходимо для обеспечения однородности электрического поля между ними. Часть 12 трубки между токовыми электродами 4 и 5 должна быть сделана с постоянным по длине внутренним поперечным сечением S_0 и может быть выполнена вставкой из другого материала, устойчивого к параметрам внешней среды. Внутри части 12 трубки на заданных расстояниях от токовых электродов 4 и 5 установлены по оси трубки съемные, например, цилиндрические вкладыши 13 и 14, имеющие длины l_1 и l_2 и площади поперечных сечений S_1 и S_2 из диэлектрика с малым коэффициентом температурного расширения и устойчивого к воздействию жидкости, электропроводность которой измеряется.

Вкладыши 13 и 14 могут иметь и другую простую форму поперечного сечения, например, прямоугольную, но его площадь должна быть однородной по длине.

Геометрические размеры вкладышей 13 и 14 должны измеряться с высокой точностью при их изъятии из трубки.

На торцах вкладышей фиксируются потенциальные электроды, если вкладыши 13 и 14 соприкасаются торцами, то используются три потенциальных электрода 7, 8, и 9.

Для установки вкладышей 13 и 14 в части 12 трубки может быть сделано закрываемое боковое отверстие, а выводы потенциальных электродов 7, 8 и 9 могут быть выполнены через вкладыши. Внутри трубки параллельно оси установлен распределенный проводной термометр сопротивления 15 во внешнем корпусе из диэлектрика с достаточно малой тепловой инерцией, по-

зволяющей отслеживать температуру жидкости внутри с достаточной точностью.

Блок регистрации 2 предназначен для формирования рабочего тока внутри трубки части 12 между электродами 4 и 5, величина которого устанавливается на токовых электродах 4 и 6, исходя из заданных условий измерения и контролируется с помощью потенциальных электродов 10 и 11, сьема напряжения U_1 с потенциальных электродов 7 и 8 и напряжения U_2 с потенциальных электродов 8 и 9, а также вычисления значения удельной электропроводности χ по результатам измерения I_0 , U_1 и U_2 . Это выполняется следующим образом. При рабочем токе I_0 между электродами 4 и 5 для напряжений U_1 и U_2 справедливо

$$U_1 = \frac{I_0}{\chi} \cdot \left(\frac{l_1}{S_0 - S_1} \right), \quad (10)$$

$$U_2 = \frac{I_0}{\chi} \cdot \left(\frac{l_2}{S_0 - S_2} \right). \quad (11)$$

Удельная электропроводность χ вычисляется по выражению

$$\chi = \frac{I_0 (U_2 l_1 - U_1 l_2)}{U_1 U_2 (S_2 - S_1)}. \quad (12)$$

В общем случае (формула 12) можно говорить только об определяющих геометрических размерах l_1 , l_2 , $S_2 - S_1$ вкладышей, которые выражаются не одним числом, а тремя.

Из формулы 12 видно, что результат измерения не зависит от площади сечения S_0 трубки. В случае $l_1 = l_2 = l$ из выражения 12 получим

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{I_0 (U_2 - U_1) l}{U_1 U_2 (S_2 - S_1)} = \frac{I_0 (U_2 - U_1)}{U_1 U_2} \cdot \frac{l}{S_2 - S_1} = \\ &= \frac{I_0 (U_2 - U_1)}{U_1 U_2} \cdot A. \end{aligned} \quad (13)$$

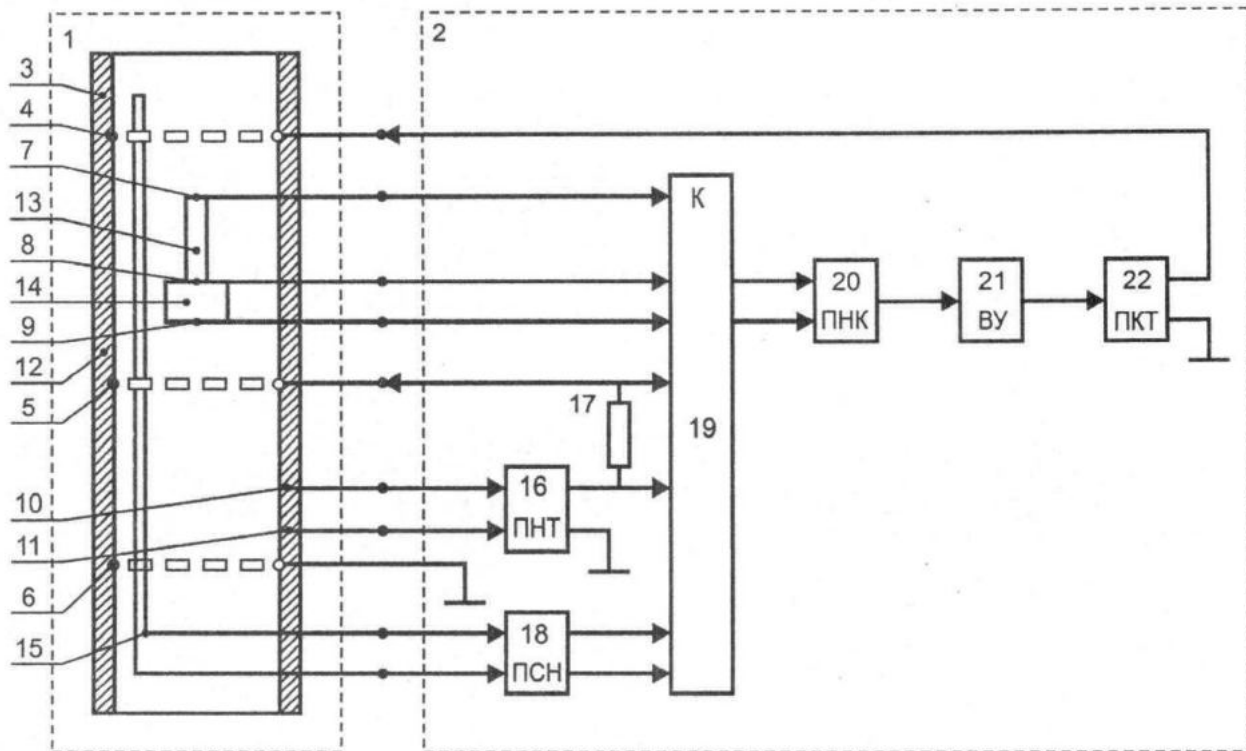


Рис. 5 – Измеритель удельной электропроводности на базе восьмиелектродного датчика с двумя вкладышами

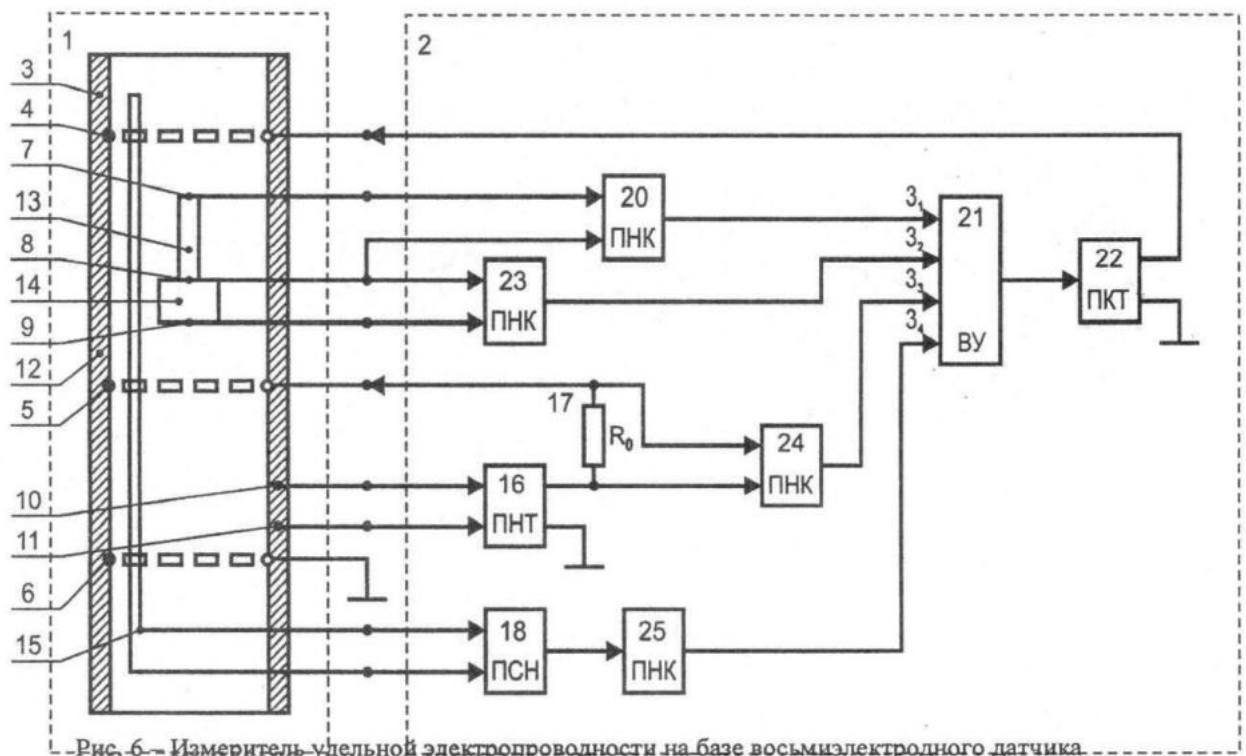


Рис. 6 – Измеритель удельной электропроводности на базе восьмиелектродного датчика с двумя вкладышами и параллельным преобразованием сигналов

Можно говорить о некотором эквиваленте "геометрической постоянной"

$$A = \frac{l}{S_2 - S_1}. \quad (14)$$

Различные энергетические режимы измерения обеспечиваются возможностью установления произвольного значения тока I_0 . Так, например, в режиме заданной температуры жидкости, контролируемой датчиком 15, ток I_0 изменяется для нагревания жидкости до этой температуры. В режиме заданной мощности P , выделяемой в жидкости рабочим током между электродами 7 и 8, значение последнего I_i устанавливается после нескольких итераций с измерений U_{1i} и использованием выражения

$$I_i = \frac{P I_{i-1}}{U_{1i}}. \quad (15)$$

Это обусловлено нестационарностью условий нагрева и изменений параметров жидкости в измерительной ячейке.

Более детально рассмотрим выполнение функций блока 2 регистрации при двух вариантах исполнения измерителя. На рис. 5 представлен блок регистрации, который выполнен в составе преобразователя 16 напряжения в ток, входы которого соединены с потенциальными электродами 10 и 11, а выход через резистор 17 подан на токовый электрод 5 преобразователя 18 сопротивления в напряжение, входы которого соединены с выходами термометра сопротивления 15, а выходы поданы на коммутатор 19, входы которого также соединены с потенциальными электродами 7, 8, 9 и выводами резистора 17, а выход подан на цепочки последовательно включенного преобразователя 20 напряжения в код, вычислительного устройства 21 и преобразователя 22 кода в ток, выход которого подан на токовые электроды 4 и 6.

В качестве преобразователя 16 напряжения в ток может использоваться диффе-

ренциальный усилитель с токовым выходом. Преобразователь 18 сопротивления в напряжение может быть выполнен включение термометра сопротивления на выходе генератора тока.

Резистор 17 должен быть образцовым. Коммутатор 19 выполняется на стандартных элементах.

Преобразователь 20 напряжения в код выполняется известным образом в зависимости от тока, постоянного или переменного, используемого для питания измерительной ячейки.

В качестве вычислительного устройства 21 используется микропроцессор.

Преобразователь 22 кода в ток выполнен последовательным соединением преобразователя кода в напряжение и преобразователя напряжения в ток или другим известным образом.

Блок регистрации 2 работает следующим образом.

Измерительная ячейка 1 погружается в жидкость или устанавливается на проток жидкости в трубке 3. Вычислительное устройство 21 вырабатывает значение I_0 рабочего тока, который устанавливается на выходе преобразователя 22 и между токовыми электродами 4 и 6. Если ячейка 1 погружена в жидкость, то ток I_0 внутри трубки 3 меньше тока I_0 за счет протекания тока вне трубки. Ток внутри трубки 3 измеряется на участке между электродами 5 и 6 компенсационным способом, при котором между электродами 6 и 5 навстречу рабочему току I_0 с выхода преобразователя 16 напряжения в ток подается компенсационный ток до полной компенсации тока I_0 , при которой напряжение между электродами 10 и 11, которое подается на вход преобразователя 16, становится равным нулю. Таким образом, через резистор 17 протекает ток I_0 и снимаемое с него напряжение U_0 равно $R_0 I_0$. Это напряжение U_0 поступает через коммутатор 19 и преобразователь 20 в вычислительное устройство 21 и используется для вычисления

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} \quad (16)$$

и установления заданного режима измерения значения тока I_0 , так, как об этом сказано выше.

Далее коммутатор 19 опрашивает электроды 7 и 8, 8 и 9, подает снимаемые с них напряжения U_1 и U_2 на преобразователь 20, который преобразует их в код и выдает в вычислительное устройство 21, которое с учетом выражений 3 и 4 вычисляет значение удельной электропроводности жидкости по формуле

$$\chi = \frac{U_0(U_2 I_1 - U_1 I_2)}{R_0 U_1 U_2 (S_2 - S_1)}. \quad (17)$$

При таком составе блока 2 регистрации опрос электродов измерительной ячейки 1 производится последовательно.

Аналогично выше изложенному осуществляется работа измерителя при втором варианте его исполнения (рис. 6). Отличие состоит лишь в том, что в этом случае блок 2 регистрации обеспечивает одновременное преобразование напряжения U_0 , U_1 и U_2 . При этом блок 2 регистрации выполнен следующим образом.

На первый токовый электрод 4 и третий токовый электрод 6 поданы выходы преобразователя 22 кода в ток. Первый точечный потенциальный электрод 7 и второй точечный потенциальный электрод 8 поданы на входы первого преобразователя 20 напряжения в код. Второй точечный потенциальный электрод 8 и третий точечный потенциальный электрод 9 поданы на входы второго преобразователя 23 напряжения в код. Четвертый точечный потенциальный электрод 10 и пятый точечный потенциальный электрод 11 поданы на входы преобразователя 16 напряжения в ток, выход которого через резистор 17 подан на второй токовый электрод 5. Выводы резистора 17 соединены с входами третьего преобразователя 24 напряжения в код. Выходы преобразователя 18 сопротивления в напряжение поданы на входы четвертого преобразователя 25 напряжения в код. Выходы всех четырех пре-

образователей напряжения в код поданы на вычислительное устройство 21, выход которого соединен с входом преобразователя 22 кода в ток.

Преобразователи 23, 24 и 25 могут быть выполнены аналогично преобразователю 20 напряжения в код.

В зависимости от конкретного применения устройство в целом может работать на постоянном, знакопеременном или гармоническом переменном токе. При этом источник тока вырабатывает соответствующие необходимые токи, а все преобразователи 16, 18, 20, 22, 23, 24 и 25 преобразуют соответствующие напряжения и токи. В случае постоянного тока в качестве преобразователей напряжения в код могут быть использованы известные преобразователи поразрядного уравнивания или интегрирующие с достаточным быстродействием и точностью. В случае знакопеременного или переменного гармонического тока преобразователи напряжения переменного или знакопеременного тока в код выполняются двухтактными интегрирующими, с синхронизацией от источника тока, с постоянным по длительности первым тактом и информативной длительностью второго такта, которая и преобразуется в код известным образом.

Преобразователь 16 напряжения в ток во всех случаях может реализоваться известным образом на базе дифференциального усилителя с токовым выходом, например, в [12, с. 72-75].

Таким образом, измеритель обеспечивает измерение в среде удельной электропроводности жидкости при заданной или контролируемой температуре с высокой точностью, поскольку эквивалентная кондуктивная постоянная измерительной ячейки определяется размерами вкладышей простой геометрической формы, которые легко контролируются.

Представляется целесообразным поиск технологически простых конструктивных решений датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сопач Э.Д. Электропроводность как метод определения солености морских вод. — М.: Гидрометиздат, 1958. — 139 с.

2. Современные методы и средства измерения гидрологических параметров океана / Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Забурдаев В.И. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
3. Забурдаев В.И. Дистанционные гидрозонды. В кн.: Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 547 – 557, 562 – 589.
4. L.J. Vander Panw: A method of measuring specific resistivity and isolate effect of dises of an ebitrary shape. Philips Research Reports. Vol. 13, № 1, 1958.
5. Lampard D.G. A new theorem in electrostatics with applications to calculate standards of capacitance: Proceldings JEE monograph № 216, Janery, 1957. - P. 271.
6. А.с. СССР 1133531. Устройство для измерения электропроводности жидкостей. Хажуев В.Н., Неаполитанский Е.А. Оpubл. в БИ № 46, 1985.
7. Лопатин Б.А. Кондуктометрия. – Новосибирск, изд-во СО АН СССР, 1964. – 279 с.
8. А.с. СССР № 109917. Способ измерения удельной электропроводности веществ с электролитической проводимостью. Лопатников В.И. Зарегестрировано в Гос. реестре изобретений 30.10.1957.
9. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Издание второе. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 725 с.
10. Бабий В.И., Бабий М.В. Метод измерения удельной электрической проводимости морской воды // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 1998. – С. 80 - 82.
11. Положительное решение по заявке на изобретение № 95010055 от 03.01.1995 (Украина). Измеритель электропроводности жидкости. Гайский В.А., Ермаков А.Г. Оpubл. в бюл. «Промислова власність», 1997. – С. 263.
12. Дутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Энергоатомиздат, Л.О. – Ленинград, 1988.