

**ОБРАЗЦОВОЕ СРЕДСТВО
ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОВОДИМОСТИ И СОЛЕННОСТИ
МОРСКОЙ ВОДЫ
(ПОРТАСОЛ-МГИ)**

Ю.И. Шаповалов

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

В статье приводятся результаты разработки образцового средства измерения относительной электрической проводимости и солёности морской воды.

Введение. В мировой практике в океанологии для обеспечения единства измерения солёности принята шкала практической солёности ШПС-78, которая основана на измерении относительной электрической проводимости (ОЭП) [1]. В соответствии с ШПС-78 поверочная схема для передачи единиц ОЭП и солёности может быть представлена в следующем виде [2]: эталон единицы ОЭП, представляющий собой стандартный раствор хлористого калия, → вторичный эталон единицы ОЭП, представляющий собой стандартный образец морской воды (нормальная вода), аттестуемый по ОЭП и практической солёности, → рабочий раствор, через который передаются единицы ОЭП рабочим гидрологическим средствам измерения электрической проводимости и солёности (например, СТД-зондов). Передача единиц ОЭП и солёности от эталонов к рабочим средствам измерения ОЭП и солёности осуществляется с помощью образцовых средств измерения (ОСИ) – компараторов ОЭП, солемеров. Наивысшие требования к точности измерения ОЭП и солёности образцовых средств измерения определяются общей погрешностью установления шкалы практической солёности ШПС-78. В работе [2] определены следующие требования по точности к средствам измерения, исходя из общей погрешности установления ШПС-78:

– средняя квадратическая погрешность компараторов ОЭП не должна

превышать $(0,3 - 1) \cdot 10^{-5}$ отн. ед. в диапазоне изменения ОЭП (R_t) от 0,07 до 1,2 отн. ед.;

– среднее квадратическое значение погрешности неоднородности и непостоянства температуры в рабочем растворе и погрешности измерения температуры не должно превышать $3 \cdot 10^{-4}$ °С.

С другой стороны требования по точности измерения к ОСИ обусловлены необходимым допустимым превышением по точности по отношению к аттестуемым рабочим средствам измерения ОЭП. Современные проблемы изучения Мирового океана, в особенности в глубоководной ее части (более 1000 м), предъявляют высокие требования к рабочим средствам измерения по точности измерения солёности. Так, например, по программе изучения Мирового океана WOCE погрешность измерения рабочих средств измерения по солёности находится на уровне образцовых средств и не должна превышать 0,002 е.п.с. [3].

В качестве образцовых измерительных средств ОЭП и солёности в мировой практике наиболее широкое использование получили лабораторные солемеры AUTOSAL (Guildline, Канада). На Украине в качестве образцовых средств ОЭП и солёности, в МГИ НАН Украины, используется в настоящее время лабораторный солемер СОКОЛ (МГИ 4602) [4] 1991 г. выпуска.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики ОСИ ОЭП и солёности морской воды наиболее широко используемые в настоящее время в мировой практике и на Украине при градуировках и поверках СТД-зондов и определения солёности, отобранных батометрами проб воды при прецизионных измерениях солёности морской воды.

Стандартные образцы морской воды, являющиеся неотъемлемой частью ОСИ ОЭП и солёности, в настоящее время на Украине и странах СНГ не выпускаются (до 1992 г. стандартные образцы морской воды серийно выпускались в ИО РАН Российской Федерации). В МГИ НАН Украины в настоящее время приобретается и используется английская стандартная морская вода IAPSO STANDARD SEAWATER (Англия) [5], стоимостью 100 евро за одну емкость

объемом 0,25 л. В связи с разным солевым составом океанической воды и вод в бассейнах Черного и Азовского морей и в соответствии с последними международными требованиями по измерению солености вод Мирового океана, для бо-

лее точных измерений солености в этих бассейнах необходимо организовывать выпуск черноморско-азовской стандартной морской воды, для чего необходимо иметь образцовое средство ОЭП.

Т а б л и ц а 1

Основные технические характеристики зарубежных и отечественных ОСИ ОЭП и солености

Параметры	Тип ОСИ ОЭП и солености			
	PORTOSAL Model 8410 (Канада)	AUTOSAL Model 8400 (Канада)	MS-310 (Канада) [6]	СОКОЛ МГИ 4602 (Украина) [4]
<u>Соленость, е.п.с.</u>				
Диапазон измерения	2 – 42	5 – 42	2 – 42	2 – 42
Погрешность измерения	±0,003	±0,003	±0,004	±0,005
Стабильность	–	±0,002 (24 ч.)	–	±0,005 (8 ч.)
Разрешающая способность	0,0003	0,0002	0,0002	0,001
<u>ОЭП (УЭП), отн.ед., (мСм/см)</u>				
Диапазон измерения	0,0001 – 1,15 (0,004 – 76)	0 – 2	0,0001 – 2	0,05 – 1,2
Погрешность измерения	–	–	±0,0001 (±0,004)	±8·10 ⁻⁵
Разрешающая способность	(0,0003)	–	0,00001 (<0,0004)	0,00004 (0,001)
Стабильность	–	–	±5·10 ⁻⁵ (24 ч.)	–
<u>Температура, °С</u>				
Диапазон измерения	15 – 36	18 – 33	15 – 30	18 – 28
Погрешность измерения	±0,02	±0,02	±0,005	±0,1
Стабильность	0,001 (1 день)	0,001 (1 день)	0,005 (год)	–
Объем пробы, мл	100	100	<100	<250
Габаритные размеры, см	53x45x42	61x48,3x53,3	28x28x18	80x65x58

Как видно из табл. 1 солемер СОКОЛ уже не удовлетворяет современным океанологическим требованиям, морально и физически устарел. Необходимость выполнения МГИ НАН Украины и другими учреждениями Украины государственных и международных программ по изучению вод Мирового океана остро ставит проблемы по организации в Украине выпуска образцовой (стандартной) черноморско-азовской воды в разработке и изготовлении, удовлетворяющего современным требованиям, образцового средства измерения ОЭП и солености. Накопленный в МГИ НАНУ опыт по разработке, эксплуатации рабочих и образцовых средств измерения электрической проводимости и солености, позво-

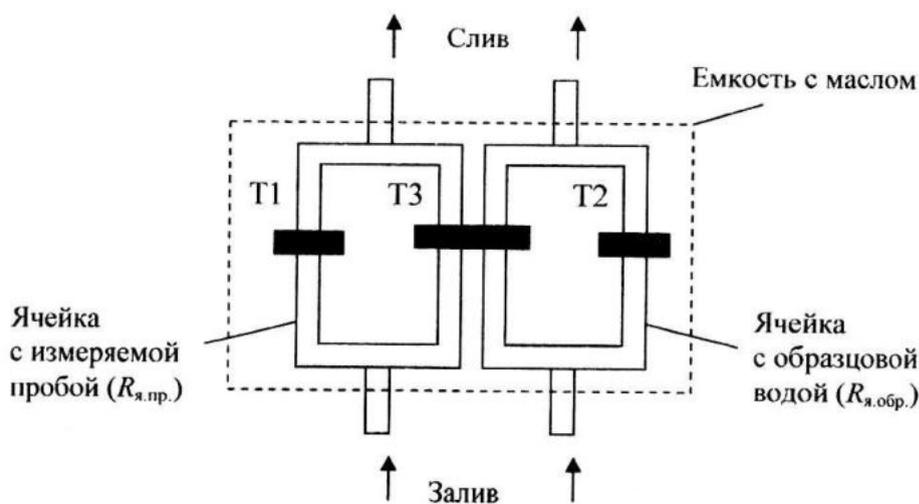
лил в рамках государственной программы «Экогидроконтроль» разработать макетный образец образцового средства измерения ОЭП и солености, удовлетворяющего современным океанологическим требованиям.

Результаты разработки. Во всех известных образцовых средствах ОЭП и солености использовались и используются два метода измерения ОЭП и солености. Один из методов, который применен в лабораторных солемерах PORTASAL и AUTOSAL, основан на использовании одной кондуктометрической измерительной ячейки, с помощью которой производится измерение удельной электрической проводимости. При таком методе ОЭП измеряемой пробы

воды (R_t) определяется вначале измерением температуры и удельной электрической проводимости стандартной морской воды $C(35, t_1, 0)$, т.е. осуществляется вначале калибровка солемера. Далее определяется температура и удельная электрическая проводимость измеряемой пробы воды $C(S, t_2, 0)$. Вводится поправка по разности измеренных температур (приведение удельной электрической проводимости к одной температуре t), определяется ОЭП измеряемой пробы: $R_t = C(S, t, 0)/C(35, t, 0)$ и затем по значениям R_t и температуре t в соответствии с уравнением ШПС-78 определяется соленость [1].

Второй метод, так называемый дифференциальный метод, основан на использовании двух идентичных измерительных ячеек электропроводности, помещенных в емкость с жидким термостабилизирующим маслом, при этом одна ячейка заполняется стандартной морской водой, вторая – измеряемой пробой воды. В данном методе осуществляется непосредственное измерение ОЭП пробы $R_t = C(S, t, 0)/C(35, t, 0)$ при одной и той же температуре. Равенство температур обеспечивается тщательным перемешиванием масла. По значениям R_t и измеренной температуре t в соответствии с уравнением ШПС-78 определяется затем соленость измеряемой воды. Данный метод был использован в лабораторном солемере с применением кон-

тактных двух электродных ячеек электропроводности [7]. Дифференциальный метод измерения с использованием двух индуктивных бесконтактных ячеек впервые был применен в лабораторном солемере СОКОЛ, на отдельные технические решения которого были получены в свое время авторские свидетельства СССР [8, 9]. Характеристики солемера СОКОЛ были подтверждены в ходе международного сличения с солемером AUTOSOL Вудсхолского океанографического института (США) в экспедиции 43 рейса НИС «Академик Вернадский» в 1991 г. На рис. 1 представлена функциональная схема такой индуктивной бесконтактной дифференциальной ячейки для измерения ОЭП. Две идентичные стеклянные ячейки помещаются в емкость, заполненную маслом, которое тщательно перемешивается для выравнивания температуры по всему объему емкости. В одну из ячеек заливается образцовая морская вода, в другую – измеряемой пробы. Ячейки образуют, таким образом, витки связи между трансформаторами Т1, Т3 и соответственно между Т2, Т3. Трансформаторы Т1 и Т2 служат для возбуждения токов в соответствующих витках связи. Трансформатор Т3 представляет собой компаратор токов, выходной сигнал которого пропорционален разности УЭП пробы и образцовой воды.



Р и с. 1. Функциональная схема дифференциальной измерительной ячейки ОЭП

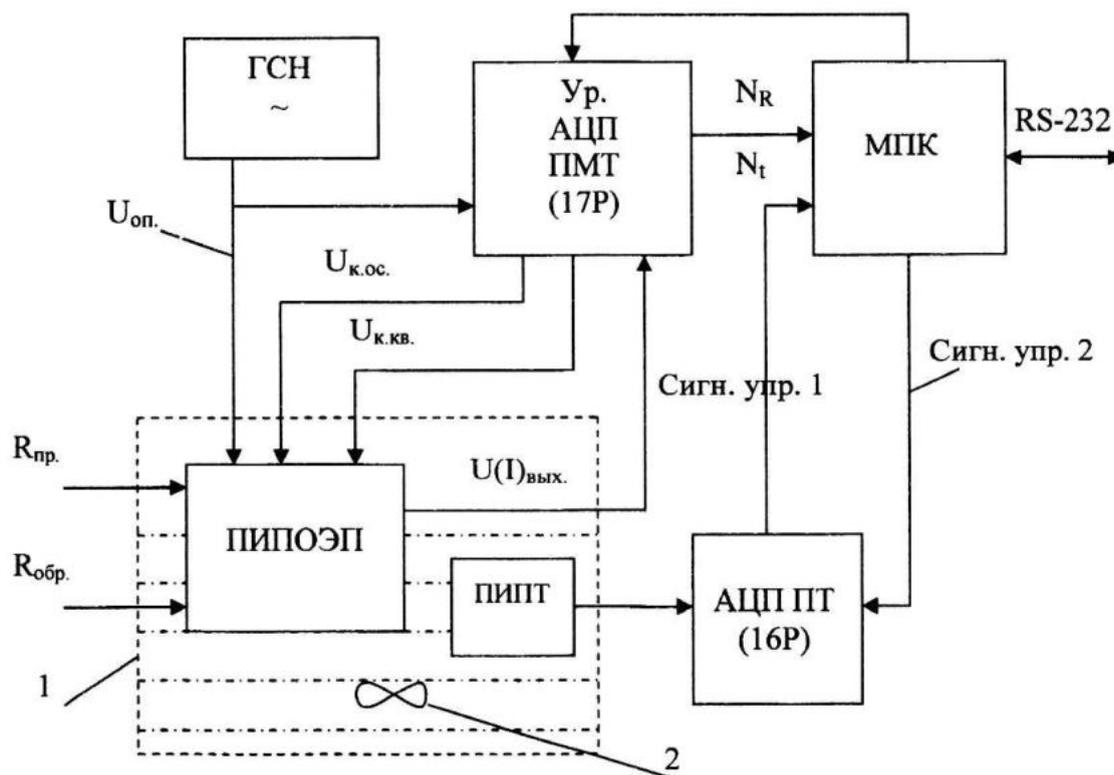
К преимуществу дифференциального метода следует отнести следующее:

- непосредственное измерение ОЭП пробы;
- не требуется термостабилизации раствора в емкости;
- более низкие требования к точности измерения температуры при определении солёности;
- существенная экономия образцовой морской воды (опыт эксплуатации солемера СОКОЛ показал, что образцовая вода в ячейке может длительное время не меняться).

На основе дифференциального метода в течение 2008 – 2010 гг. в МГИ НАНУ был разработан, изготовлен и испытан макетный образец портативного солемера ПОРТАСОЛ-МГИ.

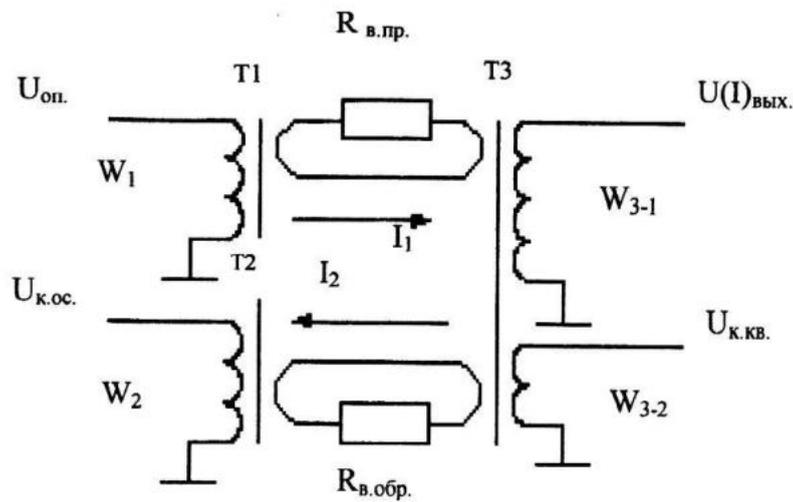
На рис. 2 приведено структурное построение солемера ПОРТАСОЛ-МГИ.

В солемере, как видно из рис. 2, для измерения температуры жидкости в емкости используется в качестве ПИПТ платиновый термометр сопротивления с сопротивлением при 0 °С – $R_0 = 100$ Ом и 16-ти разрядный АЦП постоянного тока (АЦП ПТ) с дельта – сигма модуляцией. Для измерения ОЭП используется 17-ти разрядный уравнивающий АЦП переменного тока (Ур.АЦП ПМТ) с поразрядным уравниванием и ПИПОЭП, представляющий собой трансформаторный уравнивающий мост. Управление АЦП осуществляется микропроцессорным контроллером (МПК), который формирует выходной информационный кадр и осуществляет обмен с ПЭВМ. На рис. 3 представлена схема электрическая принципиальная ПИПОЭП, поясняющая принцип измерения ОЭП.



1 – емкость, заполненная силиконовым маслом; 2 – мешалка; ГСН – генератор синусоидального напряжения ($U_{оп.}$); ПИПОЭП – первичный измерительный преобразователь ОЭП; ПИПТ – первичный измерительный преобразователь температуры; Ур.АЦП ПМТ – 17-ти разрядный уравнивающий АЦП переменного тока; АЦП ПТ – 16-ти разрядный АЦП постоянного тока; МПК – микропроцессорный контроллер.

Р и с. 2. Структурная схема солемера ПОРТАСОЛ-МГИ



Р и с. 3. Схема электрическая принципиальная ПИПОЭП

ПИПОЭП представляет собой трансформаторный уравнивающий мост, который в процессе измерения уравнивается в комплексной плоскости, т.е. уравнивание осуществляется как по основной составляющей (напряжением $U_{к.ос.}$), так и по квадратурной составляющей (напряжением $U_{к.кв.}$). Квадратурная составляющая в данном случае является паразитной составляющей, которая связана с комплексным характером элементов моста и других элементов АЦП ПМТ, и ее компенсация необходима для обеспечения при измерении основной составляющей требуемой разрешающей способности. Рассмотрим принцип преобразования ОЭП, являющейся основной составляющей в упрощенной форме без учета комплексности элементов моста.

На обмотку W_1 трансформатора Т1 поступает с генератора опорное напряжение $U_{оп.}$, которое возбуждает в витке связи ячейки с пробой ток I_1 равный (с учетом того, что вторичная обмотка трансформатора Т1 имеет один виток):

$$I_1 = \frac{U_{оп.}}{W_1 \cdot R_{в.пр.}}, \quad (1)$$

где W_1 – число витков намагничивающей обмотки трансформатора Т1; $R_{в.пр.}$ – сопротивление жидкостного витка связи измеряемой пробы.

$$R_{в.п} = \frac{1}{C_n(S, t, 0) \cdot A_n}, \quad (2)$$

где $C_n(S, t, 0)$ – УЭП измеряемой пробы; A_n – коэффициент преобразования (геометрическая постоянная) ячейки с измеряемой пробой.

На обмотку W_2 трансформатора Т2 поступает с АЦП ПМТ напряжение компенсации основной составляющей $U_{к.ос.}$, которое возбуждает в витке связи образцовой ячейки ток I_2 равный:

$$I_2 = \frac{U_{к.ос.}}{W_2 \cdot R_{в.обр.}}, \quad (3)$$

где W_2 – число витков намагничивающей обмотки трансформатора Т2; $R_{в.обр.}$ – сопротивление жидкостного витка связи образцовой воды.

Соответственно

$$R_{в.обр.} = \frac{1}{C_o(35, t, 0) \cdot A_o}, \quad (4)$$

где $C_o(35, t, 0)$ – УЭП образцовой воды; A_o – коэффициент преобразования (геометрическая постоянная) ячейки с образцовой водой.

В процессе измерения последовательным подбором в АЦП напряжения

компенсации $U_{к.ос.}$ добиваются равенства токов I_1 и I_2 , тем самым уравнивая трансформаторный мост:

$$I_1 - I_2 = 0. \quad (5)$$

Подставляя в (5) соответственно выражения (1) – (4) и, выполняя простые преобразования, получаем выражение преобразования ОЭП:

$$U_{к.ос.} = U_{оп} \cdot \frac{W_2 \cdot A_n}{W_1 \cdot A_o} \cdot \frac{C_n(S, t, 0)}{C_o(35, t, 0)}. \quad (6)$$

В свою очередь напряжение $U_{к.ос.}$, формируемое в АЦП ПМТ равно:

$$U_{к.ос.} = U_{оп} \cdot \frac{N_{Rl}}{N_m}, \quad (7)$$

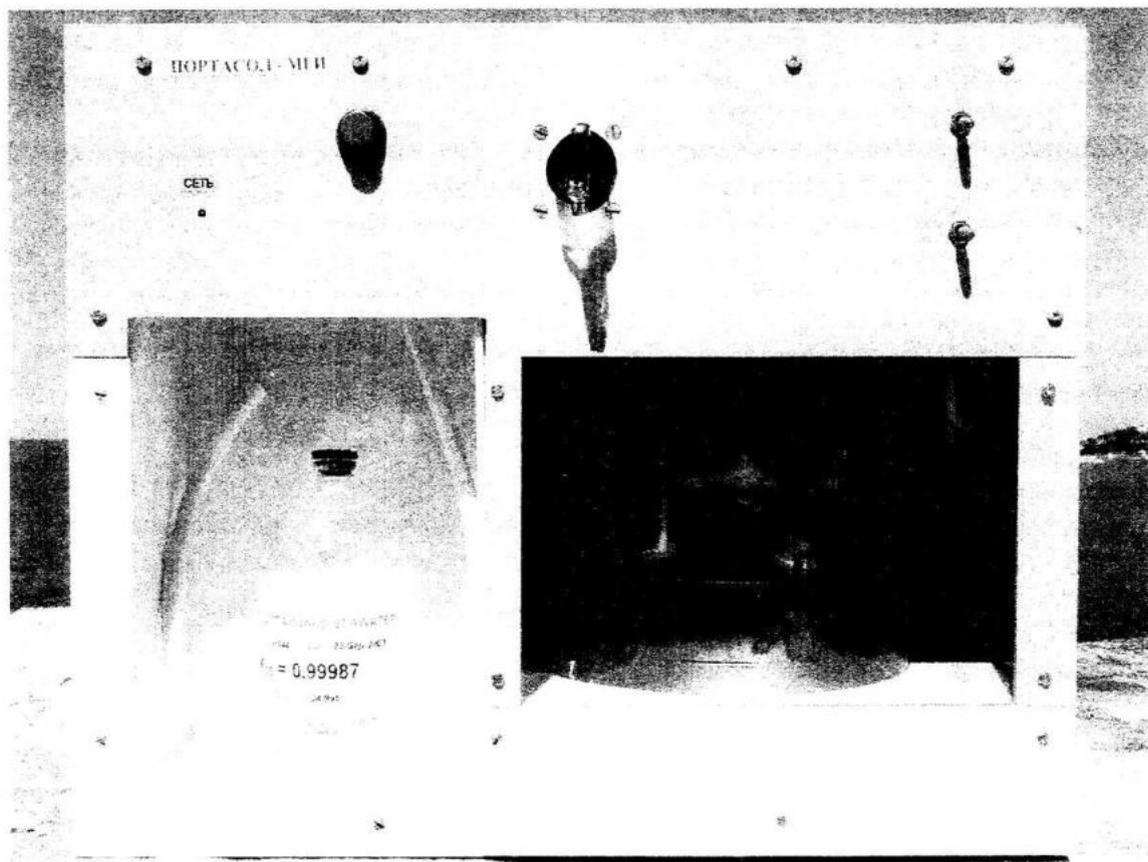
где N_{Rl}, N_m – соответственно текущее и наибольшее значение десятичного кода АЦП ПМТ (в данном случае для 17-ти разрядного АЦП ПМТ $N_m = 131071$).

Подставляя выражение (7) в (6) получаем значение ОЭП измеряемой пробы, прямо пропорциональное коду АЦП:

$$R_n = \frac{C_n(S, t, 0)}{C_o(35, t, 0)} = \frac{N_{Rl}}{131071} \cdot \frac{W_1 \cdot A_o}{W_2 \cdot A_n}. \quad (8)$$

На рис. 4 представлен общий вид разработанного макетного образца ПОРТАСОЛ-МГИ.

В табл. 2 приведены основные технические характеристики ОСИ ОЭП ПОРТАСОЛ-МГИ, полученные по результатам лабораторных испытаний.



Р и с. 4. Внешний вид макетного образца образцового средства измерения ОЭП и солёности ПОРТАСОЛ-МГИ

Основные технические характеристики ОСИ ОЭП ПОРТАСОЛ-МГИ

Наименование параметра	Значение параметра		
	ОЭП, отн. ед.	Температура, °С	Соленость, е.п.с.
1. Диапазон измерения	0,0001 – 1,25	0 – 32	2 – 42
2. Разрешающая способность	0,00001	0,0005	0,0002
3. Погрешность измерения	±0,0001(0,008 %)	±0,015	±0,003
Объем пробы, мл	<100		
Габаритные размеры, мм	380×300×210		
Время измерения пробы, мин	10		

Проверка линейности характеристики преобразования ОЭП осуществлялась по эквивалентам витков связи опорной и измерительной ячеек, в качестве которых использовались отобранные резисторы типа С2-29 и С5-61.

Действительные значения сопротивления резисторов определялись с помощью вольтметра универсального цифрового постоянного тока В7-39. В качестве образцовой меры ОЭП ($R_{обр.i}$) в данном случае принимались значения ОЭП, полученные расчетным методом по формуле:

$$\pm \left[0,006 + 0,001 \left(\frac{r_D}{r_x} - 1 \right) \right] \% \text{ – для верхнего диапазона 1 кОм,} \quad (10)$$

$$\pm \left[0,01 + 0,001 \left(\frac{r_D}{r_x} - 1 \right) \right] \% \text{ – для верхнего диапазона 10 кОм,} \quad (11)$$

где r_D – конечное значение сопротивления диапазона измерения; r_x – измеряемое сопротивление.

Разрешающая способность В7-39 составляет 0,001 %.

На рис. 5 представлены результаты проверки линейности характеристики преобразования солемера для линейной статической характеристики преобразования ОЭП вида:

$$R_{\text{тол.}} = C_{0R} + C_{1R} \cdot N_R, \quad (12)$$

$$R_{обр.i} = \frac{r_{обр.}}{r_{изм.i}}, \quad (9)$$

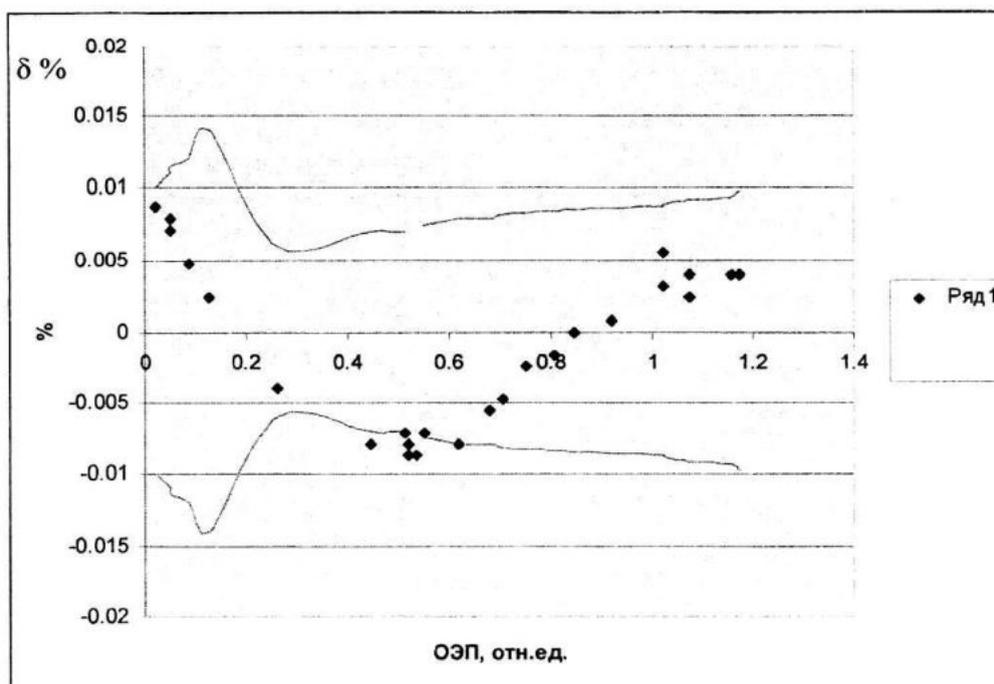
где $r_{обр.}$ – сопротивление эквивалента образцовой ячейки; $r_{изм.i}$ – сопротивления эквивалента измерительной ячейки.

Точность образцовой меры ОЭП ($R_{обр.i}$) при этом определялась погрешностью измерения сопротивления вольтметром В7-39. Относительная погрешность измерения сопротивления В7-39 составляет, согласно паспортным данным, в диапазонах от 200 Ом до 10000 Ом:

где C_{0R} , C_{1R} – коэффициенты определяемые при градуировке; N_R – значение выходного кода измерительного преобразователя Ур.АЦП ПМТ.

На рис. 5 представлены отклонения показаний солемера от образцовой меры в относительных единицах δ в диапазоне измерения солемера (от 0 до 1,25 ОЭП), определяемые по формуле:

$$\delta = \frac{R_{\text{тол.i}} - R_{обр.i}}{1,25} \cdot 100 \%. \quad (13)$$



Р и с. 5. Относительные отклонения показаний солемера от образцовой меры (ряд 1) и область, ограниченная линиями, относительной погрешности образцовой меры вольтметра В7-39 в диапазоне измерения ОЭП солемера

Как видно из рис. 5 отклонения показаний находятся в области погрешности вольтметра В7-39 (сплошные линии) и в диапазоне измерений от 0 до 1,2 отн. ед. отклонения носят параболический характер и при квадратичной функции преобразования отклонения показаний могут быть значительно снижены.

Отсутствие образцовых вод разной солености не позволило произвести оценку линейности характеристики преобразования всего измерительного тракта.

Выводы. Результаты предварительных лабораторных испытаний рабочего макетного образца показали его работоспособность. Результаты проектирования макетного образца могут быть взяты за основу разработки конструкторской документации для изготовления рабочих образцов и проведения государственных приемочных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. UNESCO. 1981. The practical salinity scale 1978 and international equation of State of Sea water 1980. Techn. Pap. mar. Sci, 36:25 pp.
2. Забурдаев В.И. Требования к средствам для воспроизведения шкалы практической солености ШПС-78 и

соответствующей шкалы относительной электрической проводимости // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1998. – С. 56 – 63.

3. Word Ocean Circulation Experiment. WOCE Operations Manual // WHP Office Report WHPO 90-1. WOCE Report No. 67/91. July 1991, Rev. 1. Woods Hole, Vass., USA (Unpublished manuscript). – P. 17 – 23.
4. Гаврилкин В.Г., Нагибин С.Н., Манская А.А. и др. Результаты измерений электролитической проводимости и практической солености морской воды в Международном проекте CCQM-P111 // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 84 – 94.
5. www.osil.co.uk
6. Johnson F., Shkvorets I. Ocean Performance of the New MS-310 // Sea Technology, 10. – 2006. – P. 15 – 19.
7. Bradshaw A.L. and Schleicher. Electrical Conductivity of Seawater JEEE / Journal of oceanic engineering. Vol. OE-5, NO 1. January 1980.
8. Авторское свидетельство СССР № 1064190, кл. G 01 N 27/02, 1982.
9. Авторское свидетельство СССР № 1337821, кл. G 01 R 27/02, 1986.