

УДК 551.46.09

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ СРЕДЫ

<sup>1</sup>Лискин В.А., <sup>1,2</sup>Римский-Корсаков Н.А., <sup>1</sup>Руссак Ю.С.

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова» РАН, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Москва,  
e-mail: nrk@ocean.ru

Мировое океанологическое приборостроение создало целую гамму измерителей гидрофизических параметров морской воды, среди которых отметим основные параметры, а именно давление, температуру, электропроводность, с возможным доукомплектованием их датчиками расширенного ряда гидрофизических и гидрохимических параметров, а также гидрологических (скорость и направление течений). Из всего многообразия методов измерения океанологических параметров наиболее эффективным остается метод измерения *in situ*, т.е. измерения океанологических параметров в реальном времени, в том числе с помощью зондирующих приборов. Одним из наиболее важных параметров морской воды является растворенный кислород, который в связанном виде входит в ее состав. Присутствие кислорода в морской среде необходимо для осуществления жизненно важных окислительных процессов. Содержание и характер его распределения в водных массах может служить показателем интенсивности биохимических и окислительно-восстановительных процессов. Использование в составе комплекса измерителей специального аппаратного модуля предварительной обработки, выполненного на базе современных микропотребляющих процессоров, позволяет осуществлять предварительную обработку в реальном времени данных, получаемых с разнообразных датчиков. Управляющие программы основного блока состоят из подпрограмм, управляющих аппаратными средствами, включающих модули чтения-записи энергонезависимой памяти, модули чтения данных аналого-цифровых преобразователей, а также программы обмена данными по последовательным линиям связи между устройствами. Комплекс программного обеспечения, реализуется на базе современных средств разработки и отладки программного обеспечения, что позволяют программировать алгоритмы сбора и обработки данных на языках высокого уровня.

**Ключевые слова:** измерители, океанологические, параметры, процессоры, зондирующие, комплексы

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A NEW GENERATION TECHNICAL MEANS FOR MEASURING THE MAIN OCEANOLOGICAL PARAMETERS OF THE MARINE ENVIRONMENT

<sup>1</sup>Liskin V.A., <sup>1,2</sup>Rimskiy-Korsakov N.A., <sup>1</sup>Russak Yu.S.

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru;

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru

World oceanological instrumentation has created a whole range of meters for measuring the hydrophysical parameters of sea water, among which we note the main parameters, namely: pressure, temperature, electrical conductivity, with the possibility of supplementing them with sensors for an extended range of hydrophysical and hydrochemical parameters, as well as hydrological (speed and direction of currents). Of all the variety of methods for measuring oceanological parameters, the method of *in situ* measurement remains the most effective, i.e. measurements of oceanological parameters in real time, including with the help of sounding instruments. One of the most important parameters of sea water is dissolved oxygen, which is included in its composition in a bound form. The presence of oxygen in the marine environment is necessary for the implementation of vital oxidative processes. The content and nature of its distribution in water masses can serve as an indicator of the intensity of biochemical and redox processes. The use of a special hardware pre-processing module as part of the complex of meters, based on modern micro-consuming processors, allows real-time pre-processing of data received from various sensors. The control programs of the main unit consist of subroutines that control hardware, including read-write modules of non-volatile memory, data read modules of analog-to-digital converters, as well as programs for exchanging data via serial communication lines between devices. The software complex is implemented on the basis of modern software development and debugging tools, which allow programming algorithms for collecting and processing data in high-level languages.

**Keywords:** gauges, oceanological, parameters, processors, probing, complexes

Мировое океанологическое приборостроение создало целую гамму измерителей гидрофизических параметров морской воды, среди которых отметим основные, а именно давление, температуру, электропроводность, с возможным доукомплектованием их датчиками расширенного ряда

гидрофизических и гидрохимических параметров, а также гидрологических (скорость и направление течения). Наиболее современными приборами, используемыми в практике океанологических исследований, являются измерительные системы ряда известных западных фирм, например

SeaBird Electronics, Inc. General Oceanics, Inc / G.O. Environmental, Inc. В настоящее время ведутся разработки нового поколения океанологических зондов и станций, для измерения гидрохимических и гидрофизических параметров морской среды, а также ведения мониторинга параметров среды с использованием энергосберегающих технологий и гидроакустической телеметрии измеренных параметров. Это особенно важно в условиях возрастающих требований к пространственному изучению изменчивости гидрофизической обстановки и гидрохимических параметров среды в акваториях Мирового океана.

#### **Материалы и методы исследования**

Наиболее эффективным из всего многообразия методов измерений основных океанологических параметров (уже упомянутых температуры, электропроводности, гидростатического давления, а также содержания химических элементов) остается метод измерения *in situ*, т.е. измерения океанологических параметров в реальном времени, в том числе с помощью зондирующих приборов. Океанологические зонды представляют собой приборы с набором разнообразных датчиков, объединенных с системой сбора и обработки, построенных, как правило, на базе современных микропроцессорных средств и расположенных в едином корпусе прибора. Современные микроэлектронные технологии позволяют создать надежную и компактную систему обработки и накопления измеренных гидрофизических данных на базе микропотребляющих процессоров и запоминающих устройств непосредственно в процессе измерений. Предлагаемая система сбора и обработки данных выполняется на базе современных микрокомпьютерных средств и включает средства измерения аналоговых данных, а также реализованные на энергонезависимых средствах памяти запоминающие устройства. Блок измерения гидрофизических данных, получаемых с датчиков в аналоговом виде, построен на базе 24-разрядного S-D аналого-цифрового преобразователя и обеспечивает необходимую точность измерения базовых параметров среды (температуры, давления и электропроводности). При этом для измерения расширенного диапазона разнообразных специфических океанологических параметров используются специализированные дополнительные устройства (модули), ориентированные на различные типы датчиков, диапазоны измерений и требуемые точности представления данных.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

##### *Измерители океанологических параметров*

В основе современных измерителей удельной электропроводности, температуры, гидростатического давления и кислорода лежит преобразование этих параметров в электрический сигнал, а затем в цифровой код. Цифровой код – наиболее удобный вид представления данных для передачи по подводным линиям связи, дальнейшей их регистрации с помощью современных накопителей информации и последующей обработки. Чувствительные элементы, измерительные и цифровые преобразователи довольно разнообразны как по принципу работы, так и по конструктивному исполнению. Наиболее общими требованиями, предъявляемыми к ним, являются высокие точностные показатели, (на настоящее время это: погрешности измерения температуры – 0,001°C, удельной электропроводности – 0,001 мСм/см, гидростатического давления 1 кПа, кислорода 0,05 ‰), возможность без искажений передавать изменчивость измеряемых параметров частотой десятков герц. Обеспечивается стойкость чувствительных элементов к воздействию давлений до 60 Мпа, а также коррозионная стойкость в морской воде [1, 2].

##### *Измерители солености (электропроводности)*

Для измерения солености морской воды был разработан датчик измерения электропроводности, в котором применен апробированный индуктивный способ измерения удельной электропроводности раствора (электролита), основанный на принципе электромагнитной индукции. Измеренная удельная электропроводность морской воды, в свою очередь, связана известным соотношением с соленостью раствора. Так, индуктивные первичные преобразователи используются для измерений проводимости витка воды, которая, в свою очередь, трансформируется в соленость посредством специальных формул соответствия. При измерениях проводимости точность зависит от стабильности электромагнитных свойств трансформаторов, от активных сопротивлений обмоток, индуктивностей рассеяния и намагничивания, а также витка связи. Поскольку диапазон изменения рабочей температуры, в которой находятся датчики, достаточно велик ( $t = (-2) - (+40)^\circ\text{C}$ ), то стабилизировать названные параметры весьма непросто. Тем не менее в настоящее время

индуктивные двухтрансформаторные первичные преобразователи электропроводности получили широкое распространение в гидрологической аппаратуре. Реальные образцы датчиков для конкретных образцов приборов имеют следующие технические характеристики: рабочий диапазон 0,1–7,2 Сим/м; частота питающего напряжения (10+/-0,1) КГц; выходное напряжение 1–2000 мВ; паразитная емкость не более 12 пФ; сопротивление витка жидкости не более 150 Ом (приведенные характеристики уточняются по мере совершенствования методик и средств измерений).

#### *Измерители температуры*

Как известно, наилучшими метрологическими характеристиками обладают проволочные металлические термометры сопротивления, а также кварцевые резонаторы. Для изготовления термометров используется платина или медь, никель и вольфрам. Как показывает опыт, значительной долговременной стабильностью обладают термометры сопротивления, изготовленные из платины высшей очистки. С другой стороны, качественные медные термометры сопротивления уступают платиновым по показателю долговременной стабильности, имеют большую длину чувствительного элемента при одинаковом начальном сопротивлении и равном диаметре провода. С другой стороны, для меди, в отличие от платины, упрощается коррекция номинального сопротивления чувствительного элемента, а также уменьшается влияние находящихся при другой температуре выводных соединителей, так как вклад их сопротивления в общее сравнительно небольшой. С созданием микроэлектронных цифровых измерительных мостов с линейной характеристикой преобразования, возросло значение такого показателя медного термометра, как линейность. Приведем параметры одного из вариантов датчика измерений температуры морской воды, который преобразует значение температуры воды в электрическое сопротивление проводника. Чувствительный элемент преобразователя выполнен из медного эмалированного микропровода толщиной 0,02 мм и длиной 4 м. Конструктивно он образует жгут длиной 80 мм. Защита микропровода от воздействия окружающей среды обеспечена медной трубкой (медь обладает одним из наибольших коэффициентов теплопроводности). Внешний диаметр трубки 0,5 мм. Наружная поверхность трубки подвергнута механическому наплету. За счет этого трубка обеспечивает надежную работу чувствительного элемента при заданных значениях

гидростатического давления. Электрохимическая защита медной трубки осуществлена слоем оловянисто-свинцового сплава, нанесенного гальваническим путем. Пространство между жгутом чувствительного элемента и медной трубкой заполнено теплопроводящей пастой. Это позволяет дополнительно снизить показатель тепловой инерции преобразователя. Статическая характеристика преобразования канала измерений температуры:

$$\theta = C_{00} + C_{01} N_{\theta} + C_{02} N_{\theta}^2 + C_{03} N_{\theta}^3 + C_{0K} (N_K - N_{K20}),$$

где  $C_{00}, C_{01}, C_{02}, C_{03}, C_{0K}$  – коэффициенты статической характеристики преобразования, определяемые при поверке (аттестации);  $N_{\theta}$  – значение кода канала измерений температуры в десятичной системе счисления;  $N_K$  – значение кода контрольного канала в десятичной системе счисления;  $N_{K20}$  – значение кода контрольного канала, зафиксированное при поверке (аттестации).

Техническими характеристиками варианта датчиков температуры: рабочий диапазон 0,1–7,2 Сим/м; выходное напряжение 1–2000 мВ; сопротивление витка жидкости, не более 150 Ом; габаритный размер над плоскостью установки 120 мм; паразитная емкость, не более 12 пФ.

#### *Измерители давления*

В качестве первичного измерительного преобразователя гидростатического давления применен один из вариантов тензорезисторного преобразователя, функционирование которого основано на использовании известного тензорезисторного эффекта в итеро-эпитаксиальной пленке кремния, нанесенной на поверхность монокристаллической пластинки из сапфира. Пластика монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами прочно соединена с металлической мембраной измерительного блока. Мембрана размещена внутри корпуса измерительного блока. Измеряемое давление, воздействуя на внешнюю поверхность мембраны, вызывает ее прогиб, и таким образом происходит пропорциональное изменение сопротивления тензорезисторов. Внутренняя поверхность мембраны сообщена с окружающей средой, что обуславливает измерение избыточного давления. Статическая характеристика преобразования канала измерений гидростатического давления:

$$P = C_{1P} (N_P - N_{P0}),$$

где  $C_{1P}$  – коэффициент статической характеристики преобразования, определенный

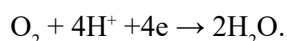
при поверке (аттестации);  $N_p$  – значение кода канала измерений гидростатического давления в десятичной системе счисления при нулевом избыточном давлении;  $N_{p0}$  – значение кода канала измерений гидростатического давления в десятичной системе счисления при нулевом избыточном давлении, зафиксированное при поверке (аттестации).

Канал измерения давления удовлетворяет следующим требованиям: пределы измерения избыточного давления морской воды, Мпа 0,1–2,5, основная погрешность – 1% [3, 4].

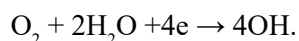
#### *Измерители содержания кислорода*

Одним из наиболее важных параметров морской воды является растворенный кислород, который в связанном виде входит в ее состав. Присутствие кислорода в океане необходимо для осуществления жизненно важных окислительных процессов. Содержание и характер распределения кислорода в водных массах может служить показателем интенсивности биохимических и окислительно-восстановительных процессов. Первичный измерительный преобразователь кислорода (ПИПК) состоит, в частности, из двухэлектродной электрохимической ячейки, (индикаторный электрод-катод и вспомогательный электрод-анод), которые помещаются в раствор электролита. Суммарный процесс электровосстановления кислорода на твердых электродах происходит с участием четырех электронов.

В кислых растворах:



В щелочных растворах:



Кинетика процесса электровосстановления кислорода на твердых электродах существенно зависит от рН электролита. Изучение электровосстановления кислорода, например, на золотом и серебряном электродах показало, что на полярограммах имеются две волны в области рН от 2 до 14. Исследования показали, что в области рН от 11 до 14 переходный ток второй волны постоянно увеличивается, в то время как растворимость кислорода уменьшается. В первичных измерительных преобразователях кислорода применяют различные типы неполяризуемых вспомогательных электродов. В системах с внешним источником напряжения, основным условием выбора материала вспомогательного электрода (анода) является как отсутствие самопро-

извольного его растворения в электролите, так и растворение его в условиях анодной поляризации. Анод в таких системах изготавливают из металлов, практически не окисляющихся и не развивающих собственного потенциала, с большой поверхностью и малой пространственной плотностью тока (платина, золото, серебро). Вспомогательные электроды, используемые в системах с внутренним источником напряжения, хорошо окисляются и генерируют за счет этого собственную ЭДС. К достаточно часто используемым режимам работы первичного измерительного преобразователя кислорода относится режим постоянного тока. При замыкании электродов (или подключении внешнего источника питания) вначале происходит бросок тока, затем ток уменьшается и через некоторое время, при неизменной концентрации кислорода, ток достигает какой-то постоянной величины. Режим постоянного тока и характеризуется работой именно на этом участке. При изменении концентрации кислорода изменяется значение установившегося тока пропорционально изменению концентрации кислорода, но так как электроды постоянно замкнуты, то явление бросков тока отсутствует. В одном из вариантов реализации преобразователь конструктивно включает корпус, изготовленный из компаунда, в который встроены электроды – индикаторный и вспомогательный. Как правило, алюминий используется в качестве материала вспомогательного электрода. Электролит, представляющий собой 0,5 N раствора KCl, заполняет пространство внутри корпуса. В преобразователе предусмотрена барокомпенсация для предохранения полимерной мембраны от разрушения при повышении гидростатического давления. Обычный резиновый колпачок используется в качестве барокомпенсатора. В итоге проведенных исследований разработан и изготовлен образец датчика концентрации кислорода со следующими техническими характеристиками: рабочий диапазон 0,01–12,0 ‰; показатель инерции, с 3; выходное напряжение, мВ 0,1–120.

#### *Средства предварительной обработки*

Использование специального аппаратного модуля предварительной обработки, выполненного на базе современных микропотребляющих процессоров, позволяет осуществлять сбор и предварительную обработку в реальном времени данных, получаемых с разнообразных датчиков зондирующего комплекса. Все это выполняется

на базе современных средств разработки и отладки программного обеспечения, которые позволяют программировать алгоритмы сбора и обработки данных на языках высокого уровня. Таким образом, достигается универсальность зондирующего комплекса, в том смысле, что при функциональном расширении (например, при добавлении новых типов датчиков или изменении существующих схем измерения данных) не требуется существенно перестраивать состав аппаратуры и алгоритмы функционирования зондирующего комплекса. Для хранения измеряемых гидролого-гидрофизических данных (в том случае если зондирующее устройство не связано в процессе измерения с центральным компьютером) служит модуль цифровой энергонезависимой памяти, совмещенный с модулем центрального процессора. Современные микропотребляющие блоки памяти позволяют хранить первичные и обработанные данные значительных объемов. Этого вполне достаточно для хранения рядов измеренных океанологических параметров, получаемых при длительных автономных измерениях.

*Программное обеспечение модуля*

В состав управляющих программ базового модуля входят драйверы конкретных устройств, вспомогательные модули чтения-записи энергонезависимой памяти, модули считывания данных аналого-цифровых преобразователей, подпрограммы обмена данными по последовательным линиям связи между модулями. Структурная схема программного обеспечения приведена на рисунке.

Программное обеспечение обслуживает два режима работы: основной, в котором производится измерение, предварительная обработка и запоминание данных, и вспо-

могательный режим, в котором предварительно сохраненные данные передаются в центральный компьютер. В настоящей версии программы не предусмотрена возможность изменения калибровочных коэффициентов, временных соотношений и последовательности опроса датчиков во время функционирования базового модуля – все эти параметры программируются одновременно с адаптацией управляющей программы. Тексты подпрограмм-драйверов адаптируются для каждого конкретного набора датчиков. Такой подход позволяет достичь универсальности базового модуля и не изменять интерфейсные программы центрального компьютера при изменении структуры данных [5, 6].

**Заключение**

Разрабатываемое новое поколение океанологических зондирующих и стационарных комплексов для измерений и исследований морской среды, её гидрохимических и гидрофизических параметров с использованием гидроакустической телеметрии и энергосберегающих технологий позволит обеспечить непрерывное развитие океанологического приборостроения. По принципу «один параметр измерений – один измерительный модуль» могут быть созданы мобильные многопрофильные океанологические комплексы, в том числе и придонные, позволяющие решать обширный ряд гидрофизических и гидрохимических исследований в океане, в том числе в труднодоступных районах, с минимальным привлечением экспедиционного флота. Это особенно важно в условиях возрастающих требований к пространственному изучению изменчивости гидрофизической обстановки и гидрохимических параметров среды в акваториях Мирового океана.



*Структурная схема программного обеспечения*

**Список литературы**

1. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Использование профилографов скорости звука для определения плотности воды // *Материалы Первой МНТК по термогидромеханике океана. Современные проблемы океана «СПТО-2017»*. 2017. Т. 1. С. 46–49.
2. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Новое уравнение для расчета плотности морской воды по измерениям скорости звука // *Системы контроля окружающей среды*. Вып. 7 (27). С. 12–18. Севастополь: ИПТ, 2017.
3. Писарев С.В. Современные дрейфующие роботизированные устройства для контактных измерений физических характеристик арктического бассейна // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47. № 4. С. 5–31.
4. Серов В.А., Ковшов И.В., Устинов С.А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подледных) месторождений полезных ископаемых // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2017. № 9. (194). С. 181–192.
5. Савин А.Н. Параллельный вариант алгоритма условной оптимизации комплексным методом Бокса // *Известия Саратовского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2012. Т. 12. Вып. 3. С. 109–117.
6. Борисов А.Н., Борисова М.А. Моделирование интеллектуальной системы управления в параллельной вычислительной среде // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Технологии построения когнитивных транспортных систем»*. СПб., 2018. С. 228–231.