

УДК 551.46.09

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АВТОНОМНЫХ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПРИДОННЫХ СТАНЦИЙ

Лискин В.А., Тихонова Н.Ф., Руссак Ю.С.

Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru

Основной задачей исследований являлось создание научно-технической базы по разработке, созданию и натурным испытаниям комплекса придонных станций нового поколения. Проведены анализ, обоснование и выбор конструктивных и функциональных схем комплекса станций, включающих блок измерения гидрофизических параметров и гидрохимический блок, для измерения параметров химического массообмена на поверхности раздела «вода – дно». Обоснованы и выбраны функциональные схемы микрокомпьютерной системы управления океанологическими датчиками и системы накопления данных гидрофизического блока. Проведены разработка и обоснование функциональной и принципиальной схем базового измерительного модуля, на основе микропотребляющих процессоров, в том числе устройства измерения аналоговых параметров. Определены оптимальные конструкторско-технологические решения чувствительных элементов датчиков температуры морской воды, давления, электропроводности и кислорода. Выполнена разработка и обоснование функциональной схемы акустического измерителя скорости и направления течения, на основе анализа современных методов измерения вектора скорости потока и сравнения различных акустических методов: импульсного, фазового и частотного. Выполнена оценка возможных погрешностей и проведен выбор оптимальных методов их преодоления. Разработан вариант системы цифровой гидроакустической связи с автономными приборами. Сделан выбор оптимальных методов для передачи команд (медленная связь) и передачи данных (быстрая связь) на основе анализа современных методов помехоустойчивой связи в морской среде. Выполненные исследования позволили создать научно-техническую базу для дальнейших разработок и натурных испытаний комплекса донных станций.

Ключевые слова: комплекс, станций, придонных, гидроакустическая, связь, глубоководные, эксперименты

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A COMPLEX OF AUTONOMOUS HYDROLOGICAL-HYDROCHEMICAL BOTTOM STATIONS

Liskin V.A., Tikhonova N.F., Russak Yu.S.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru

The main objective of the research was to create a scientific and technical base for the development, creation and full-scale testing of a complex of new generation bottom stations. The analysis, justification and selection of structural and functional diagrams of the complex of bottom stations, including a unit for measuring hydrophysical parameters and a hydrochemical unit, for measuring the parameters of chemical mass transfer at the water-bottom interface, have been carried out. The functional schemes of the microcomputer control system for oceanological sensors and the data storage system of the hydrophysical unit are substantiated and selected. The development and justification of the functional and circuit diagrams of the basic measuring module based on micro-consuming processors, including a device for measuring analog parameters, has been carried out. The optimal design and technological solutions of the sensitive elements of the sensors for temperature of seawater, pressure, electrical conductivity and oxygen are determined. The development and justification of the functional diagram of an acoustic velocity and directional flow meter has been carried out, based on an analysis of modern methods for measuring the flow velocity vector, and comparing various acoustic methods: pulse, phase, and frequency. An assessment of possible errors is made and a selection of optimal methods for overcoming them is made. A version of a digital sonar communication system with autonomous devices has been developed. The choice of optimal methods for transmitting commands (slow communication) and data transmission (fast communication) is made, based on the analysis of modern methods of noise-immune communication in the marine environment. The studies performed allowed us to create a scientific and technical base for further development and field testing of the complex of bottom stations.

Keywords: complex, stations, bottom, sonar, communication, deep-sea, experiments

В настоящее время измерения гидрологических (океанологических), гидрофизических и гидрохимических параметров в толще воды морей и океанов, а также процессов химического массообмена на поверхности раздела «вода – дно» выполняются различными типами придонных комплексов, которые принципиально не могут совмещаться. Первые представлены в основном такими станциями, как, например, CTD-F фирмы «Cheisea Technologies Group», CTD-S4 фирмы «Inter Ocean Systems, inc» и VCM-60 фирмы «General

Oceanics». Вторые представлены так называемыми «лендерами», например, Гетеборгского университета. Предлагается подход построения ряда придонных станций на основе базовых измерительных комплексов, включающих помимо датчиков параметров среды измерительные схемы, микропроцессоры и микроконтроллеры, что позволит повысить надежность работы, оперативно изменять конфигурацию комплекса станций в соответствии с возникающими задачами измерений, упростить процесс калибровки каналов измерения.

Структура комплекса донных станций

В процессе проводимых в Институте океанологии РАН исследований предложено совместить несколько типов станций в едином комплексе. При этом такие станции предлагается выполнить из трех совместимых, но самостоятельных изделий:

– блока исследования гидрологических (скорость и направление течения и др.) данных (рисунок, А);

– гидрохимического блока для измерения параметров химического массообмена на поверхности раздела «вода – дно» с соответствующими специфическими устройствами и датчиками (рисунок, Б);

– блока измерения гидрофизических параметров в толще воды и в придонном слое (рисунок, В).

Такая схема существенно упрощает и удешевляет создание комплекса донных станций, повышает их надежность (стоимость современных «лендеров» (гидрохимическое направление) превышает 100 000 \$), а для их постановки требуется специальное оборудование. В процессе исследований создания комплекса выполнен анализ достоинств и недостатков существующих автономных станций и обоснованы требования как к конструкции, так и к функционированию комплекса станций.

Основными требованиями являются:

– высокая надежность работы, постановки и подъема комплекса донных станций;

– максимально возможная простота изготовления, калибровки, подготовки к постановке, постановки, съема информации и подъема;

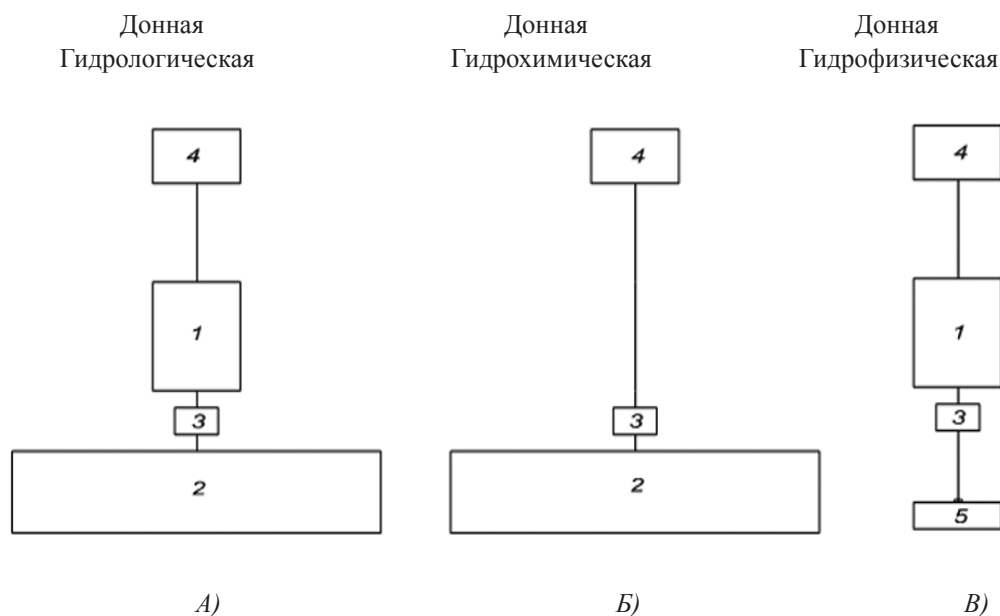
– минимально возможные размеры и вес;

– минимально возможная стоимость изготовления и эксплуатации;

– удовлетворение международным требованиям по точности измеряемых параметров.

Базовые требования по диапазону и погрешностям измеряемых параметров приведены в таблице. Эти требования и параметры могут дополняться и корректироваться в соответствии с разработками современных измерителей и датчиков.

Высокая надежность работы и гибкость перестройки состава и структуры комплекса станций определяется модульным принципом построения и использованием микрокомпьютерных технологий с цифровыми твердотельными накопителями информации. Качество постановки и функционирования комплекса в основном связано с наличием гидроакустического канала считывания данных, что позволяет дистанционно оценивать качество постановки и функционирования. Надежность всплытия комплекса предполагается обеспечить тройным дублированием размыкающей системы (гидроакустический канал связи, гидроакустический канал размыкателя и таймер) и двойным дублированием исполнительного механизма размыкания.



Варианты компоновки модулей и блоков комплекса донных станций.
На рисунке обозначено: 1 – блок океанологических, гидрофизических модулей;
2 – гидрохимический блок; 3 – размыкатель троса; 4 – плавучесть; 5 – якорь

Базовые требования по диапазону и погрешностям измеряемых параметров

1. Параметры гидрофизического блока	Величины параметров
Давление, бар/%FS	0-100/0,1
Температура, °C	-2+40/0,005
Электропроводность, мСм/м	1,2-72/0,005
Растворенный кислород, O ₂ , мл/л	0-12/0,25
2. Параметры гидрохимического блока	
pH, ед.	2-12/0,05
Растворенный метан, CH ₄ , мл/л	0-30/0,01
3. Параметры гидрологического блока	
Направление течения, град	0-360/2
Скорость течения, см/с	0-500/2

Простота компоновки и калибровки каналов измерения обеспечивается их исполнением в виде отдельных измерительных модулей с цифровым выходом, объединенных общей шиной данных. Физически общая шина располагается в центральном модуле-коллекторе. Измерительная часть помещена в цилиндрические легкоъемные стальные модули-корпуса, которые стыкуются с коллектором и устанавливаются на каркасе станции. Коллектор имеет до 8 стыковочных узлов. Съем измеренных и частично обработанных данных осуществляется по гидроакустическому каналу. Оптимальные весогабаритные показатели комплекса обеспечиваются его конструктивными особенностями, связанными с современными материалами корпуса и плавучестей, а также возможностью оснащения комплекса перед его постановкой только необходимыми измерительными блоками. Размер корпуса и размещение на нем плавучестей выбираются так, чтобы обеспечить вертикальное нахождение комплекса в поверхностном слое, что необходимо для работы радио и светового маяка при состоянии волнения моря до трех баллов включительно. Предусматривается использование отечественных измерительных датчиков океанологических параметров, чувствительные элементы которых располагаются на одном уровне на корпусе комплекса, чтобы измеренные значения соответствовали методикам анализа и обработки не только синоптической и мезомасштабной, но и мелкомасштабной структуры водных масс [1, 2].

Функциональная схема комплекса

Проведение экспериментальных исследований по измерению, сбору, анализу и дистанционному считыванию параметров придонного слоя обеспечивается специальными аппаратно-программными средства-

ми. Они выполняют отбор проб придонной воды и хранение образцов в специальных камерах, работу селективных электродов и работу других измерительных схем. Оперативное управление работой комплекса и другие функциональные линии контролируются, отслеживаются и записываются микрокомпьютерной системой. Экспериментальные блоки отбора проб, включающие шприцевые пробоотборники, а также функциональные схемы предварительного анализа полученных образцов, имеют небольшие габариты, значительные объемы твердотельной памяти, обладают возможностью гибкой программируемости.

Основными измерительными элементами комплекса, наряду со шприцевыми пробоотборниками, являются электроды (выполняющие функции датчиков), из которых наиболее подходящими к применению являются кислородные электроды, а также электроды для измерения величин pH, Eh, H₂S. Для измерения потоков кислорода предполагается применять оптоды-сенсоры, основанные на волоконной оптике. Более доступными сенсорами кислорода являются системы, применяющие электроды Кларка. Однако при этом существует весьма сложная зависимость показаний этих электродов от концентрации кислорода, температуры, pH, солености, гидростатического давления и скорости перемешивания. В этом случае следует применять компьютерные модели, позволяющие учитывать эти факторы в ходе измерений динамики изменчивости кислорода в камерах донных станций. Наиболее важным фактором, обуславливающим химический обмен на границе вода – дно, является скорость движения придонной воды. От этого зависит толщина диффузионного подслоя на поверхности дна, действующего в качестве барьера между осадком и придонной водой, который определяет скорости потоков через поверхность дна. В этой

связи важно знать не только абсолютное значение скорости придонного течения, но и разницу в гидродинамическом режиме придонного слоя воды и воды, заключенной в камерах донных станций. Для измерений скорости и направления течений предполагается использовать в составе гидрофизического блока ультразвуковой измеритель скорости и направления течения. Для учета разницы в гидродинамике внутри камер и в окружающей среде планируется применить специальные вещества (гипс, гидрохинон и т.д.), скорость растворения которых зависит от скорости движения вод. Движение воды внутри камер гидрохимического блока обеспечивается перемешивающими устройствами, имитирующими гидродинамику окружающей придонной воды. Различные типы мешалок следует приспособлять к измеряемым условиям (скорость вращения, форма и размер камеры, расположение лопастей, циркуляционная система). Выбор условий перемешивания ведется экспериментально в лабораторных условиях [3, 4].

Основные блоки

Гидрохимический блок включает:

- несущую металлическую раму с установленными на ней камерами (боксами), опускаемую с судна на морское дно на тросе или в свободном падении (тонкая балансировка механической конструкции, возможен парашют);
- края боксов погружаются в донные отложения, верхняя часть боксов снабжена крышкой, закрывающейся после постановки на дне;
- моторы для перемешивания воды в боксах, имитирующие придонную гидродинамику;
- блок шприцев для отбора проб придонной воды из боксов, планируется электромеханическая система отбора.

Гидрохиноновый блок:

- это система, позволяющая корректировать разницу в гидродинамике внутри боксов в соответствии с наружной гидродинамикой.

Гидрофизический блок:

- включает измерители температуры, солености, гидростатического давления, также систему электрохимических датчиков гидрофизического блока, в том числе O_2 , величины pH и, возможно, других компонентов солевого состава.

Вспомогательные подсистемы:

- подсистемы измерения, считывания и передачи электрических сигналов с датчиков в блок накопления информации;
- подсистемы программного и операционного обеспечения работы отдельных

систем станции, включая работу моторов, шприцев и т.д.;

- подсистема акустического обеспечения работы станции, включая передачу информации на борт судна, работу размыкателей и т.д.

Система спуска – подъема:

- прорабатывается вариант самовсплывающей станции, что реализуется с помощью блоков плавучести и акустических размыкателей.

Рассмотрим более подробно структуру гидрохимического блока и подходы к его реализации. Конструктивная схема блока базируется на монтаже на единой металлической раме отдельных модулей, функционально обеспечивающих работу комплекса. Эти модули являются самостоятельными единицами, работа которых настраивается и калибруется заранее в условиях лаборатории на берегу или на судне и затем монтируется в единую систему блока, контролируемого центральным операционным микрокомпьютером. Были проработаны вопросы разработки конструкции блока в целом и монтажа отдельных элементов в комплекс, вопросы активации комплекса перед началом работ и опускания его в водной толще, установке на дне, вопросы дистанционного управления работой комплекса и его подъема. Применяемые материалы обеспечивают минимальный вес комплекса и его механическую прочность. Это алюминий и нержавеющая сталь, а также возможно применение титана, стекловолокна, волокон типа кевлара.

Отметим, что модульный принцип реализации облегчает и ускоряет замену одного или нескольких элементов конструкции и сокращает время перестановок станций и монтажа в ходе экспериментальных работ. Одновременно решается проблема загрязнения отдельных частей станции, включая измерительные камеры, шприцы, электроды, мешалки и т.д., которые в ходе сборки-разборки могут быть легко промыты водой.

Блок пробоотборников

Блок пробоотборников предназначен выполнять следующие функции: по сигналу от управляющего контроллера должна отбираться проба воды из рабочего бокса и бокса сравнения, объемом, достаточным для проведения в этой пробе всех анализов. Часть окружающей воды должна попасть при этом в бак для компенсации разряжения. Количество отбираемых проб за время постановки должно составлять от 5 до 12. Известны системы пробоотбора, использующие в качестве рабочих элементов пластиковые шприцы, закрепленные на массивном

основании, срабатывающие под действием упругого элемента, например пружины. Также входит в состав система спусковых устройств и управляющая система, обеспечивающая срабатывание шприцев в нужный момент времени. На основе проведенного анализа преимуществ и недостатков различных систем выбрана система пробоотбора, базирующаяся на пластиковых шприцах большого объема (150 мл), что является основным отличием от известных зарубежных систем, использующих шприцы малого объема. Основная решаемая задача состояла также в возможности модификации узлов для обеспечения срабатывания шприцев большого объема.

Предложена следующая функциональная схема блока пробоотбора:

- прямоугольное основание с опорными рейками для крепления рабочих шприцев;
- пружины с устройством крепления к подвижным штокам шприцев и к неподвижной рейке, закрепленной на основании;
- система взвода – спуска, включающая в себя подпружиненные упорные штоки, рычаги и сегментные опорные шайбы, размещенные на вращающейся оси;
- вращающаяся ось с опорными сегментными шайбами и передаточной звездочкой для связи с управляющим мотором;
- управляющий (шаговый) мотор, с редуктором и микросхемой управления, размещенные в герметичном корпусе, связанном по давлению путем заполнения корпуса силиконовым маслом и применении подвижной резиновой мембраны.

Таким образом, была разработана функциональная схема блока пробоотборников для океанологического и гидрохимического блоков, создан его макет и проведены лабораторные испытания, которые подтвердили достижимость заложенных в программе разработок параметров. В дальнейшем, предполагается перевод блока мотора с редуктором на отечественные комплектующие, разработку оптимальных способов крепления блока пробоотборников на рабочую раму и подсоединения шприцев гибкими шлангами к выходным штуцерам рабочих баков.

Система цифровой гидроакустической связи

В общем случае цифровая гидроакустическая связь подводного комплекса должна состоять из двух систем: системы телеуправления и системы передачи данных. Система телеуправления обладает сравнительно небольшой производительностью, но сохраняет работоспособность в широком диапазоне изменений характеристик гидро-

акустического канала и имеет малое энергопотребление. Система передачи данных обладает значительно большей производительностью и при этом имеет повышенную чувствительность к характеристикам гидроакустического канала. Для разработки системы гидроакустической связи и дистанционного считывания информации было проведено моделирование корреляционного метода передачи гидроакустических сигналов. Моделирование производилось с помощью комплекса программ, в которые входят: пакеты генерации излучаемых сигналов, пакеты моделирования многолучевости и доплеровских смещений, а также программы обнаружения передаваемой информации, использующие определение импульсного отклика параметров гидроакустического канала и когерентного суммирования многолучевых доплеровских сигналов. На основе модельных расчетов был разработан и испытан в натурных условиях макет системы гидроакустической связи. В процессе испытаний было установлено, что разработанная система гидроакустической связи обеспечивает устойчивый обмен информацией с автономной донным комплексом на расстоянии до трех морских миль. Оценка отношения сигнал/шум при расстоянии между донным комплексом и судном в три мили показала, что разработанная система гидроакустической связи способна обеспечивать передачу информации при расстоянии по крайней мере в 2–3 раза большем. В целом испытания системы гидроакустической связи показали, что она пригодна для обеспечения надежного обмена цифровой информацией с автономными подводными аппаратами на значительных расстояниях, в условиях многолучевого распространения звука и при чрезвычайно низком энергопотреблении приемной части системы (3–7 мВт в зависимости от напряжения источника питания) [5–7].

Заключение

Результаты разработки и испытаний макетов базовых измерительных комплексов на основе современных микропотребляющих процессоров и универсальных интерфейсов показывают правильность выбранного подхода модульного построения и принятой универсальной элементной базы, что позволит в последующие годы создавать и модифицировать комплексы с характеристиками, удовлетворяющими новым требованиям. Проведенные исследования и анализ методов и схем измерения скорости и направления течений показали, что фазовые измерители скорости потока

имеют значительно более простые приёмо-передающие узлы, но мощность излучения значительно ниже по сравнению с доплеровскими измерителями. Выбор метода измерения потока в основном связан с простотой конструкции датчика и его низкому энергопотреблению, что важно в случае использования датчика скорости потока в составе автономного комплекса. При этом фазовый метод реализуется при достаточно простой конструкции электронной части, так как в этом случае нет необходимости компенсировать паразитную амплитудную модуляцию, а фазо-частотные характеристики приёмо-передающего тракта могут быть калиброваны на фиксированных частотах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (темы № 0128-2021-0010) при поддержке РФФИ (проекты № 20-05-00384 «А» и № 18-05-60070 «Арктика»).

Список литературы

1. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
2. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Ключев М.С., Евсенок Е.И. Высокорастворимая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // *Процессы в геосредах*. 2016. № 2. С. 156–161.
3. Колосов К.В. Комбинированные гидроакустические приборы подводных аппаратов // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XIII Международной научно-технической конференции «МСОИ-2013»*. М., 2013. Т. 1. С. 369–372.
4. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Деградиация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 446. № 13. С. 330–335.
5. Егоров А.В., Римский-Корсаков Н.А., Рожков А.Н., Белевитнев Я.И. Опыт использования лендера ИО РАН в прибрежных водах Черного моря // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017»*. М., 2017. Т. 1. С. 323–326.
6. Karagianni Evangelia A. Electromagnetic Waves under Sea: Bow-Tie Antenna Design for Wi-Fi Underwater Communications. *Progress In Electromagnetics Research*. Moscow, 2015. Vol. 41. P. 189–198.
7. Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А., Рогинский К.А. Особенности конструирования широкополосных кабельных донных сейсмостанций для мониторинга нефтегазовых месторождений // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017»*. М., 2017. Т. 1. С. 223–227.