

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА  
«ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА ИНТЕГРАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
И ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ НА 1997-2000 ГОДЫ»

В.П.Коровин, В.М.Тимец

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

( Океанографические работы )

---

Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Гидрометеорология»  
и специальности «Океанология»



Санкт-Петербург  
ГИДРОМЕТВОИЗДАТ

2000

Уч. к. 1121

## Рецензенты:

доктор технических наук И. С. Ковчин (Институт океанологии АН РФ),  
кафедра метеорологии (и НИТМО) (Военно-морской институт им. М. В. Фрунзе)

Излагаются методы океанологических наблюдений, общие принципы и теоретические основы методов создания океанологической аппаратуры. Приведено описание наиболее широко используемых приборов, автоматических информационно-измерительных систем и технических средств для проведения океанографических работ.

Учебник предназначен для студентов и аспирантов гидрометеорологических вузов и курсантов военно-морских институтов, обучаемых по специальностям «Гидрография» и «Кораблевождение». Кроме того, может быть использован научно-техническими работниками, занимающимися исследованиями океана, и разработчиками океанологической аппаратуры.

The book by V. P. Korovin and V. M. Timets «Methods and means of hydrometeorological measurements» concerns methods of oceanographic observations, general principles and theoretical substantiation of oceanographic measuring techniques. A description is given of most popular devices, automatic measuring systems and technical means used for oceanographic research.

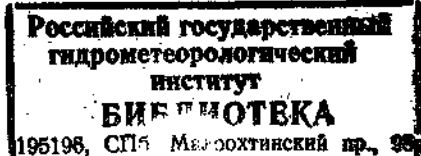
The text-book is to be used by the students of hydrometeorological universities and the Navy institutions cadets trained in specialties «Hydrography» and «Navigation». Besides the book can be used by researchers dealing with the ocean investigations and designing oceanographic techniques.

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы».*

1805040600–83  
К 069(02)–2000

© Центр «Интеграция», 2000 г.

ISBN 5–286–01889–9



# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие .....                                                        | 3   |
| Введение .....                                                           | 4   |
| Глава 1. Океанографические наблюдения .....                              | 6   |
| 1.1. Развитие океанографических исследований .....                       | 6   |
| 1.2. Виды океанографических работ .....                                  | 8   |
| Глава 2. Метрологическое обеспечение океанографических измерений .....   | 16  |
| 2.1. Основополагающие понятия и термины .....                            | 16  |
| 2.2. Метрологическое обеспечение, его основы, правила и нормы .....      | 17  |
| 2.3. Измерение. Виды измерений .....                                     | 19  |
| 2.4. Принципы, методы и методики измерений .....                         | 21  |
| 2.5. Эталоны, шкалы, стандартные образцы .....                           | 22  |
| 2.6. Передача размера единицы, поверочная схема .....                    | 24  |
| 2.7. Поверка и калибровка средств измерений .....                        | 26  |
| 2.8. Погрешности измерений .....                                         | 27  |
| 2.9. Погрешности средств измерений .....                                 | 29  |
| Глава 3. Измерение скорости звука .....                                  | 31  |
| 3.1. Звуковое поле в океане .....                                        | 31  |
| 3.2. Область применения .....                                            | 32  |
| 3.3. Прямые методы измерения скорости звука .....                        | 33  |
| 3.4. Косвенные методы определения скорости звука .....                   | 37  |
| Глава 4. Измерение глубин (промер) .....                                 | 39  |
| 4.1. Подводный рельеф .....                                              | 39  |
| 4.2. История развития промера .....                                      | 40  |
| 4.3. Цели и состав гидрографических исследований .....                   | 42  |
| 4.4. Средства для съемки рельефа дна .....                               | 45  |
| Глава 5. Наблюдения за колебаниями уровня моря .....                     | 51  |
| 5.1. Колебания уровня моря .....                                         | 51  |
| 5.2. Методы измерения колебаний уровня моря .....                        | 53  |
| 5.3. Приборы для измерения уровня моря .....                             | 63  |
| Глава 6. Методы и приборы для измерения температуры воды .....           | 72  |
| 6.1. Поле температуры .....                                              | 72  |
| 6.2. Методы измерения температуры воды .....                             | 73  |
| 6.3. Измерители температуры морской воды .....                           | 86  |
| Глава 7. Методы и приборы для наблюдений за волнением .....              | 99  |
| 7.1. История наблюдений за волнением .....                               | 99  |
| 7.2. Элементы волнения .....                                             | 100 |
| 7.3. Визуальные наблюдения .....                                         | 101 |
| 7.4. Устройства и приспособления для определения элементов<br>волн ..... | 104 |
| 7.5. Определение силы удара волн .....                                   | 122 |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 8. Приборы и методы наблюдений за течениями .....                                              | 126 |
| 8.1. Поле течений в океане .....                                                                     | 126 |
| 8.2. Методы наблюдений за течениями .....                                                            | 127 |
| 8.3. Измерение направления течений .....                                                             | 144 |
| 8.4. Аппаратура для измерения характеристик течения .....                                            | 147 |
| Глава 9. Приборы и методы для измерения оптических характеристик морской воды .....                  | 162 |
| 9.1. Гидрооптическое поле .....                                                                      | 162 |
| 9.2. Оптические свойства и характеристики морской воды .....                                         | 163 |
| 9.3. Определение относительной прозрачности и цвета морской воды .....                               | 166 |
| 9.4. Измерители гидрооптических характеристик .....                                                  | 168 |
| Глава 10. Отбор проб грунта .....                                                                    | 175 |
| 10.1. Характеристика морских грунтов .....                                                           | 175 |
| 10.2. История исследований грунта дна .....                                                          | 177 |
| 10.3. Возможности исследования донных грунтов .....                                                  | 178 |
| Глава 11. Методы и устройства для отбора проб морской воды .....                                     | 185 |
| 11.1. Методы отбора проб воды .....                                                                  | 185 |
| 11.2. Приборы и устройства для отбора проб воды .....                                                | 186 |
| 11.3. Отбор проб воды из тонкого поверхностного слоя .....                                           | 195 |
| 11.4. Хранение проб воды .....                                                                       | 196 |
| Глава 12. Определение солёности и плотности морской воды .....                                       | 198 |
| 12.1. Солёность морской воды и способы ее определения .....                                          | 198 |
| 12.2. Плотность морской воды и способы ее определения .....                                          | 210 |
| Глава 13. Приборы и методы исследования гравитационного поля Земли ....                              | 214 |
| 13.1. Гравитационное поле .....                                                                      | 214 |
| 13.2. Методы измерения гравитационного поля Земли (ГПВ) .....                                        | 215 |
| 13.3. Аппаратура для проведения гравиметрических измерений .....                                     | 218 |
| Глава 14. Наблюдения за льдом .....                                                                  | 222 |
| 14.1. Цель ледовых наблюдений .....                                                                  | 222 |
| 14.2. Наблюдения за льдами с берега .....                                                            | 222 |
| 14.3. Наблюдения за льдами с судна .....                                                             | 236 |
| 14.4. Наблюдения за льдами с летательных аппаратов .....                                             | 239 |
| 14.5. Исследование нижней поверхности льда .....                                                     | 241 |
| Глава 15. Автоматические информационно-измерительные системы для океанологических исследований ..... | 242 |
| 15.1. Проблемы развития методов измерений океанологических характеристик .....                       | 242 |
| 15.2. Зондирующие гидрологические системы .....                                                      | 245 |
| 15.3. Буксируемые гидрологические комплексы .....                                                    | 264 |
| 15.4. Автономные измерительные системы .....                                                         | 273 |
| Глава 16. Технические средства для проведения океанографических работ ....                           | 279 |
| 16.1. Особенности сбора информации в процессе океанографических работ .....                          | 279 |
| 16.2. Научно-исследовательские суда .....                                                            | 281 |
| 16.3. Автономные буйковые станции .....                                                              | 285 |
| 16.4. Буй-лаборатории .....                                                                          | 292 |
| 16.5. Стационарные и передвижные платформы для океанологических исследований .....                   | 292 |
| 16.6. Подводные аппараты .....                                                                       | 293 |



|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.7. Неконтактные технические средства проведения океанологических исследований ..... | 296 |
| Глава 17. Судовые срочные гидрометеорологические наблюдения .....                      | 298 |
| 17.1. Судовые гидрометеостанции .....                                                  | 298 |
| 17.2. Методика производства наблюдений .....                                           | 300 |
| Список литературы .....                                                                | 306 |
| Основная .....                                                                         | 306 |
| Дополнительная .....                                                                   | 306 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник написан в соответствии с программой курса «Методы и средства гидрометеорологических измерений» для студентов гидрометеорологических вузов. В учебнике рассмотрены современные методы океанологических исследований, технические средства для проведения океанографических работ, основные требования к их эксплуатации и возможности их выбора при выполнении океанологических исследований, а также дано описание наиболее широко используемых приборов и автоматических информационно-измерительных систем. Конечно же, невозможно привести все великое многообразие океанологической аппаратуры, существующей в настоящее время во всем мире, поэтому в работе сделан упор на рассмотрение общих принципов и теоретических основ физических методов, на базе которых создается подобная аппаратура.

Современные требования к точности и репрезентативности океанологической информации и к ее разрешению во времени и пространстве вызвали необходимость ввести соответствующий раздел о метрологическом обеспечении производства океанографических измерений и создании аппаратуры, написанный В. М. Тимецом.

В процессе работы над учебником авторы использовали книги В. П. Коровина и Е. И. Чверткина «Морская гидрометрия», В. П. Коровина «Зарубежные технические средства в океанологии», а также наставления и руководства по проведению наблюдений в Мировом океане, справочники по океанографическим и гидрологическим приборам и труды различных мореведческих институтов и учреждений, как отечественных, так и зарубежных.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность профессору И. А. Степанюку, Ю. Е. Щербакову и коллективу кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета за ценные замечания и советы по содержанию учебника. Авторы приносят искреннюю благодарность С. В. и Т. В. Валовым за помощь в техническом оформлении рукописи.

Авторы надеются, что учебник «Методы и средства гидрометеорологических измерений» будет также полезен специалистам, работающим в области геофизики, географии и экологии, инженерам-океанологам, гидрологам, гидротехникам, изыскателям.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из первоочередных задач, стоящих перед человечеством, является проблема изучения и освоения Мирового океана, который при средней глубине около 4000 м занимает 70,8 % поверхности земного шара. Мировой океан обладает колоссальными энергетическими, пищевыми и минеральными ресурсами, и поэтому человечество должно направить свои усилия на их освоение. Человек использует ресурсы океана с древнейших времен, но только в настоящее время исследования в этой области получают поистине глобальный характер. Эта проблема исследования и освоения океана обуславливает развитие современной океанологии — совокупности научных дисциплин, изучающих различные аспекты природы Мирового океана: физические, химические, биологические, геологические.

Материалы океанологических исследований используются в самых различных областях человеческой деятельности, таких, как обеспечение безопасности мореплавания; создание простой надежной рабочей модели гидрологических и метеорологических прогнозов; организация и проведение рыболовства и рыбоводства, т. е. поиск и прогнозирование биопродуктивных районов; проектирование и строительство различных прибрежных сооружений; добыча разнообразного сырья из вод океана и полезных ископаемых с его дна; исследование и прогнозирование экологической обстановки, а также в интересах собственно океанологии, науки, изучающей мир океана.

В результате исследований Мирового океана в последние годы была открыта сложная и тонкая динамика этого огромного естественного водоема, установлено сильное влияние океана на климат всей нашей планеты. Открытие сложной системы течений, вихревых образований, тонкой термохалинной структуры значительно усложнило задачу разработки общей теоретической модели динамики океана, поскольку для создания такой модели и особенно ее практической проверки требуется огромный экспериментальный материал о пространственно-временной изменчивости океанологических параметров.

Океанологические измерения, ведущиеся в динамически неустойчивой стратифицированной среде, физико-химические параметры которой изменяются как во времени, так и в пространстве, выдвигают жесткие требования к организации, методике и технике производства наблюдений. Пренебрежение может привести к ошибочной интерпретации результатов измерений. На основе существующих представлений об особенностях изменчивости океанологических условий решается обширный круг задач, касающихся определения продолжительности и пространственно-временной дискретности измерений, их репрезентативности, выбора аппаратуры с оптимальной

постоянной времени и чувствительностью, определения скорости перемещения измерительной аппаратуры в исследуемой среде.

Для того чтобы составить правильное представление об океане и заложить основу системы оперативных наблюдений, проводятся разнообразные исследования. И хотя к настоящему времени в изучении океана достигнуты определенные успехи, следует все же заметить, что наши знания об океане еще очень недостаточны. Видный отечественный океанолог академик Л. М. Бреховских в одной из своих работ отметил, что несмотря на то, что ученые постоянно открывают новые стороны «жизни» океана, «наши представления о нем — лишь первое приближение». Океан — необыкновенно сложная система, и для понимания его поведения необходимы колоссальные усилия и немалое время. Поэтому решение всех океанологических проблем возможно лишь усилиями всех стран, занимающихся исследованиями океана, путем накопления данных и последующего их анализа.

Для получения более качественной и полной информации о процессе процессов, протекающих в Мировом океане, особенно в глобальном масштабе, в настоящее время запланировано большое число крупных международных проектов. Но, как правило, все эти программы рассчитаны максимум на 10—15 лет. Масштабы же временной изменчивости многих процессов в океане выходят за рамки этих сроков. Поэтому на повестку дня встает вопрос о создании автоматической измерительной системы для проведения систематических долгосрочных наблюдений в глобальном масштабе.

Подобная система должна будет проводить комплексные измерения в приводном слое, а также гидрологических, гидрохимических параметров и таких биологических процессов, как первичное продуцирование, т. е. ключевых элементов, для осуществления мониторинга в глобальном масштабе во всей толще океана. Система, по возможности, должна использовать максимально автоматизированные методы измерений. Основные координационные элементы должны включать в себя численные оперативные модели, управление данными и информацией, международную координацию и надзор. И конечно же, система должна быть эволюционной, т. е. видоизменяться по мере увеличения наших знаний об океане и появления технических разработок, указывающих новые пути к достижению целей.

Правда, в настоящее время существующая техника и измерительные системы не позволяют рассчитывать на создание автоматической долговременной глобальной системы наблюдений в океане. Научно-исследовательские суда сравнительно тихоходны, дороги, поэтому требуются более оптимальные схемы долговременных наблюдений. Необходимы новые автономные системы — от космических аппаратов и акустических систем до глубоководных аппаратов. Не менее важно и то, чтобы новые измерительные системы могли давать получаемую информацию в реальном времени для оперативного использования в моделях. Но, к сожалению, в настоящее время трудно сформулировать полные и подробные требования к системе. В какой-то мере это объясняется и недостаточностью наших знаний о всем множестве процессов, которые протекают в океане.

# Глава 1

## ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

### 1.1. Развитие океанографических исследований

Велика заинтересованность человечества в исследовании и освоении Мирового океана. И конечно же понятно, чтобы изучать все многообразие процессов, которые протекают в океане, занимающем  $\frac{2}{3}$  поверхности нашей планеты, а также исследовать его дно площадью 360 млн км<sup>2</sup>, необходимы большой экспедиционный океанографический флот, достаточное число научно-исследовательских институтов и обсерваторий, а также широко разветвленная сеть морских и прибрежных гидрометеорологических станций.

Еще с первых своих выходов в море человек начал изучать океан. Вначале исследования были направлены на обеспечение безопасности мореплавания. Изучались особенности дна якорных стоянок, возможности укрытия от штормов, опасные гидрометеорологические явления и т. д. Но уже в эпоху Великих географических открытий стали производиться отдельные измерения некоторых океанографических характеристик, таких как глубина, ветер, волнение и в какой-то мере температура воды и течения. Затем постепенно стали переходить к более-менее систематическим измерениям и планомерным наблюдениям за изменениями физического состояния вод океана от места к месту. Однако и в это время океанографические работы почти никогда не являлись основной задачей плавания, а были попутными, за очень малым исключением.

Но развитие мореплавания и морских промыслов потребовало перехода к специальным океанографическим экспедициям, дающим возможность углубленного изучения особенностей процессов и явлений в Мировом океане. Эти требования сформировались уже к середине XIX в., когда возникла необходимость прокладки телеграфного кабеля по дну Атлантического океана между Европой и Северной Америкой. И вот здесь выяснилось, что, несмотря на казалось бы столбовую дорогу мореплавания, этот район совершенно не изучен — нельзя было даже предложить оптимальную трассу прокладки кабеля. Тогда-то и начались массовые промеры глубины, при этом одновременно получали данные о грунте дна океана, придонных температурах и даже о придонной жизнедеятельности. Все это оказалось довольно новым, интересным и потребовало в свою очередь незамедлительно начать изучение глубинных и придонных слоев вод открытых частей морей и океанов, разрабатывая по ходу работ необходимую аппаратуру и методику проведения океанографических исследований.

К первым специальным океанографическим экспедициям, конечно же, необходимо отнести кругосветное плавание трехмачтово-

го деревянного парового корвета «Челленджер» водоизмещением 2306 т (1873—1876 гг.). Эта экспедиция сыграла громадную роль в деле изучения океана и считается как бы начальным шагом современной океанологии.

Организованный в 1899 г. Международный совет по изучению морей (МСИМ) сыграл свою выдающуюся роль в истории океанографии, способствуя унификации методов и приборов для океанографических исследований. МСИМ разработал «стандартные» горизонты для производства наблюдений и отбора проб воды на гидрохимический анализ. На морях, омывающих Северо-Запад Европы, были намечены линии (стандартные разрезы), вдоль которых в определенных точках четыре раза в год (февраль, май, август, ноябрь) должны были производиться регулярные океанологические наблюдения. Это решение привело к проведению общих океанографических съемок на морях и в отдельных районах океанов, которые постепенно переросли в сезонные съемки. Единообразие методов исследований, принятое МСИМ, позволило сравнивать результаты наблюдений отдельных экспедиций. Установление сроков наблюдений дало возможность следить за сезонными колебаниями океанологических характеристик, а ежегодные повторения наблюдений — улавливать вековые изменения этих характеристик.

Но даже и в этом случае из-за своей эпизодичности, ограниченности во времени и пространстве океанографические наблюдения пусть даже и со специальных судов с течением времени перестали удовлетворять потребностям в океанографической информации, не позволяли совершенствовать разработку методов морских гидрологических прогнозов, тем более долгосрочных. И уже к концу 50-х годов XX в. океанологам всего мира стало ясно, что изучить громадный океан силами одной страны практически невозможно. Поэтому начиная с Международного геофизического года (МГГ) — одного из первых многонациональных исследований, проведенных в 1957—1959 гг., — стало расширяться международное океанографическое сотрудничество, координирующим центром которого стала Межправительственная океанографическая комиссия (МОК) при ЮНЕСКО, и началось создание механизма международного обмена океанографическими данными.

Решаются одни научные проблемы, на смену им идут другие, требующие уже более качественного подхода к их разрешению и более совершенных технических средств. Если в 1977—1978 гг. одним из главных международных проектов был ПОЛИМОДЕ (Советско-американская программа исследований океана, возникающая на базе двух национальных проектов: советского «ПОЛИГОН» и американского «МОДЕ»), то в 1979—1980 гг. ПИГАП (Программа исследований глобальных атмосферных процессов). В 80-е годы основные силы наших отечественных океанологов были направлены на исследование Мирового океана по проекту «Разрезы», предложенному академиком Г. И. Марцуком. Сущность данного проекта заключалась в исследовании гидрофизических и синоптических полей определенных энергоактивных районов океана, в значительной степени влия-

ющих на атмосферные процессы в областях, отстоящих за тысячи километров.

А насколько малы знания о такой грандиозной системе, как океан, видно даже из того, что в центрах сбора данных количество информации об океаносфере в тысячу раз меньше, чем об атмосфере. Поэтому разработка новых, более качественных методов и средств исследования океана является немаловажной задачей сегодняшнего и будущего поколений океанологов. Анализ истории развития методов и средств исследования Мирового океана позволяет видеть перспективу их развития в создании сложных унифицированных измерительных комплексов и во всемирном развитии многонационального сотрудничества.

Исследованиями Мирового океана в России занимаются многие ведомства: Российская академия наук, ведущей организацией которой в этой области является Институт океанологии (Москва), имеющий отделения в Санкт-Петербурге, Калининграде и Геленджике, и к которой относятся Тихоокеанский океанологический институт, Акустический институт и др.; Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) со своими научными учреждениями, такими как Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ, Санкт-Петербург) с филиалом в Мурманске, Государственный океанографический институт (ГОИН, Москва) с отделением в Санкт-Петербурге (СПбГОИН), Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ДВНИГМИ, Владивосток); и с разветвленной сетью прибрежных и островных гидрометеостанций; Министерство обороны с Главным управлением навигации и океанографии (ГУНиО), которое имеет свои научные институты и территориальные экспедиции.

Ведущей организацией в рыбной промышленности является Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) в Москве; к территориальным относятся: Полярный институт рыбного хозяйства и океанографии (ПИРО) в Мурманске, Атлантический институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО) в Калининграде, Тихоокеанский институт рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) во Владивостоке, а также бассейновые управления промысловой разведки. Исследованиями океана занимаются и некоторые другие ведомства.

## 1.2. Виды океанографических работ

*Океанографические работы* — это комплекс измерений и обработки, производимых в океане (море) с целью получения информации о их состоянии и протекающих в них процессах. Для обеспечения единообразия и сравнимости получаемой информации, что является необходимым условием ее научного обобщения и практического применения, все океанографические работы должны производиться с максимальным использованием стандартных методов производства

наблюдений с помощью поверенной аппаратуры. В зависимости от назначения все океанографические работы можно разделить на стационарные, эпизодические, полутытные и специализированные.

*Стационарные наблюдения* необходимы для получения наиболее полных рядов наблюдений за всем многообразием явлений, протекающих в данной точке Мирового океана или в каком-то его районе, а также для исследования многолетней изменчивости океанологических характеристик. Эти наблюдения ведутся непрерывно или систематически повторяются через определенные, по возможности более короткие, промежутки времени в течение ряда лет. Стационарные наблюдения производятся на береговых и островных гидрометеорологических станциях (ГМС) и постах (ГМП), а также с помощью автономных автоматических телеметрических гидрометеорологических станций; на рейдовых станциях; на океанографических разрезах; при выполнении океанографических съемок и т. д.

*Морские береговые и островные ГМС и ГМП* входят в систему Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В зависимости от объема выполняемых наблюдений и работ ГМС и ГМП бывают I, II и III разрядов. ГМС III разряда выполняют минимальное число наблюдений и работ и имеют наименьшее число сотрудников. По назначению выполняемых океанографических наблюдений ГМС и ГМП могут быть оперативными, вековыми и оперативно-вековыми.

На вековых ГМС (на них наблюдения выполняются для исследования многолетней изменчивости гидрометеорологических элементов и ведутся неограниченно долго) как минимум производятся наблюдения за уровнем моря, температурой и соленостью воды у берега, ледовые наблюдения. На оперативно-вековых ГМС наблюдения могут быть вековыми не по всем элементам, а только по некоторым из них. Оперативные наблюдения, предназначенные для оперативной информации и прогнозов, обычно включают элементы вековых наблюдений, а также наблюдения за дрейфом льдов, волнением, течением и т. д.

Наблюдения за океанографическими характеристиками на ГМС и ГМП производятся не реже чем в основные синоптические сроки — 0, 6, 12 и 18 ч по среднему гринвичскому времени (СГВ). Виды и число сроков наблюдений для каждой ГМС и ГМП определяют территориальные управления Росгидромета исходя из назначения наблюдений.

Для комплексной автоматизации прибрежных гидрометеорологических наблюдений предусмотрено создание автоматических телеметрических гидрометеорологических станций двух типов: с обслуживающим персоналом и автономных, устанавливаемых в удаленных, необитаемых и труднодоступных районах. Результаты наблюдений на этих станциях в определенном коде, в заранее заданное время, как правило по радиоканалу, должны передаваться в центры сбора информации.

*Рейдовая станция* — океанографическая станция (т. е. географическая точка в Мировом океане, где производятся океанографические



работы) в прибрежной зоне моря с постоянными географическими координатами, выполняется регулярно. Рейдовые наблюдения выполняются прибрежными ГМС I и II разрядов с малотоннажных судов, стоящих на якоре (а зимой со льда), один или несколько раз в месяц для изучения гидрометеорологического режима и его изменчивости в прибрежной части моря в районе расположения ГМС. Место нахождения рейдовой станции должно наиболее полно характеризовать гидрологический режим всей прилегающей акватории. В зависимости от задач и района исследований рейдовые станции бывают эпизодическими, полусуточными, суточными и многосуточными. Результаты наблюдений на рейдовой станции служат «связью» между результатами береговых наблюдений и результатами наблюдений, выполненных в открытом море. В том случае, если океанографический разрез начинается в районе расположения рейдовой станции, последняя является первой станцией разреза.

На морях с приливами для получения качественных данных о полном цикле приливных явлений рейдовые наблюдения проводятся на суточной станции продолжительностью не менее 26 ч в середине каждого месяца. На морях без приливов наблюдения проводятся пять раз в месяц: 1, 7, 13, 19 и 25 числа. Горизонты наблюдений (глубина, на которой производятся измерения океанографических элементов или отбор проб) на рейдовой станции те же, что и на станциях океанографических разрезов, но с добавлением горизонтов 5, 15, 25 и 35 м. При глубинах станции менее 12 м назначается дополнительный горизонт 8 м.

На рейдовой станции выполняют следующие гидрометеорологические наблюдения: определение глубины, температуры, солёности или удельного веса воды, измерения направления и скорости течения на стандартных горизонтах, определение цвета и прозрачности воды, типа, формы, направления, длины, периода волн, состояния поверхности моря, степени волнения, определение температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра, облачности, метеорологической видимости, наблюдения за атмосферными явлениями, а также при необходимости и ледовые наблюдения. Все наблюдения проводятся каждые два часа, за исключением наблюдений за глубиной, течением и ветром, которые измеряются ежечасно.

*Океанографический разрез* — последовательный ряд океанографических станций, расположенных по определённому направлению и выполняющихся в кратчайшее время. Различают стандартный разрез (океанографический разрез, станции которого закреплены на много лет постоянными географическими координатами) и вековой разрез (стандартный океанографический разрез, выполняемый регулярно, через определённые интервалы времени, в течение многих десятилетий). В настоящее время на всех морях и океанах имеются постоянные сетки океанографических разрезов. Задачей таких стационарных исследований является изучение всего комплекса процессов, протекающих в водной толще, а также исследование многолетних изменений элементов гидрологического и гидрохимического режимов отдельных морей и больших акваторий океанов.

Океанографические разрезы, пересекая всю исследуемую водную акваторию, располагаются в прибрежной области, в зоне открытого моря или переходят из одной области в другую. По своему расположению разрезы носят условные названия: прибрежные океанографические разрезы и океанографические разрезы открытого моря. Океанографические разрезы располагают так, чтобы наблюдения на них были репрезентативными для всей исследуемой акватории, т. е. характеризовали гидрологические и гидрохимические элементы в изучаемом районе, их сезонный и вековой ход, условия формирования этих элементов и их аномалий. Обычно разрезы пересекают основные струи господствующих течений, а иногда располагаются по их осям с целью изучения переноса и трансформации водных масс. Разрезы должны проходить от берега через прибрежную часть в открытое море до границы исследуемого района или до противоположного берега.

При планировании расположения и протяженности разрезов нельзя опираться на какой-либо единый стандарт, применимый к любому водному району, а всегда должны учитываться местные условия с целью обязательного достижения репрезентативности наблюдений.

Расстояние между океанографическими разрезами и размещение океанографических станций на них зависит от изменчивости гидрологических элементов в исследуемом районе, т. е. число станций должно быть больше в зоне повышенной изменчивости гидрометеорологических элементов (зоны гидрологических фронтов, прибрежные области) и меньше в зоне большего однообразия этих элементов (например, открытое море). Обычно расстояние между станциями на разрезах в открытом океане устанавливают в пределах 60—120 миль, в морях 30—60 миль, в зонах повышенной изменчивости 10—30 миль и менее. Однако число станций не должно быть большим, ибо основной задачей наблюдений на океанографических разрезах являются быстрота и возможно большая их синхронность. Разрез должен быть выполнен за время, за которое изменения гидрометеорологических характеристик было бы незначительным.

При выполнении работ на океанографическом разрезе с целью выяснения возможных изменений гидрологических элементов за время производства наблюдений целесообразно в начале, середине и конце разреза осуществлять постановку автономных буйковых станций с соответствующими самописцами на многочасовую, суточную или многосуточную работу.

При производстве работ в море выполняются океанографические станции, которые делятся: по продолжительности — на разовые, многочасовые, полусуточные, суточные, многосуточные; по положению судна, с которого ведутся работы, — на якорные и дрейфовые; по числу выполнения гидрологических серий (наблюдений, выполненных комплексом приборов, одновременно опускаемых для океанографических измерений и отбора проб на заданных горизонтах) — на односерийные и многосерийные. Кроме того, при выполнении разрезов работы производятся и на ходу судна.

На ходу судна могут выполняться следующие виды работ: срочные гидрометеорологические наблюдения; измерения температуры поверхностного слоя моря; измерения распределения океанологических характеристик по глубинам с помощью различной буксируемой и зондирующей аппаратуры; измерение характеристик течений в поверхностном слое моря с помощью электромагнитного измерителя течений (ЭМИТ); отбор проб воды на основной химический анализ и загрязнение (в основном из поверхностного слоя); непрерывные измерения гидрометеорологических характеристик в приграничном слое океан — атмосфера; специальные наблюдения, например аэрологические, актинометрические, акустические, стереофотограмметрическая оценка волнения и др.

С судна, лежащего в дрейфе, выполняются те же виды работ, что и на ходу судна (кроме измерений ЭМИТ), а также гидрологические серии; зондирование толщи воды СТД-системами; измерение характеристик волнения волнографами; измерение гидрооптических характеристик воды; постановка и снятие автономных буйковых станций с различными самописцами; гидрологические, геологические и гидробиологические работы; при условии точного определения дрейфа судна — измерения течений, т. е. осуществляются все основные глубоководные и поверхностные океанографические наблюдения и работы.

С судна, стоящего на якоре, выполняются все виды работ, что и с судна, лежащего в дрейфе, причем большинство океанографических работ выполнять гораздо удобнее. Недостатком здесь является сложность и длительность постановки судна на якорь (и снятия), в особенности на больших глубинах (для этого требуется специальная глубоководная якорная лебедка). В случае необходимости измерения течений в мелководных районах, с глубинами не более 50—100 м, и особенно течений в навигационном слое часто осуществляют постановку судна на якорь. В этом случае используются поплавки для измерения течений в навигационном слое, а глубже — самописцы течений.

Измерения океанографических характеристик и отбор проб морской воды на океанографических станциях осуществляют на стандартных горизонтах — постоянных горизонтах наблюдений, принятых для океанографических измерений и отбора проб. Для всех океанов и глубоководных морей Карского, Баренцева, Норвежского, Гренландского, Черного, Японского, Охотского, Берингова, Каспийского (кроме северной части) приняты стандартные горизонты: 0, 10, 20, (25), 30, 50, 75, 100, (125), 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000 м, далее через 1000 м и придонный горизонт, а для мелководных морей Белого, Балтийского, Азовского, северной части Каспийского, Аральского, Чукотского, Восточно-Сибирского, Лаптевых и мелководных районов глубоководных морей — горизонты: 0, (5), 10, 20, (25), 30, 40, 50, 60, (75), 80, 100, (125), 150, 200, 250 м и придонный. Для течений рекомендуются следующие стандартные горизонты: 0, (5), 10, 25, 50, 100, 200, 300, (400), 500, 750, 1000, 1200, 1500, 2000 м и далее через 1000 м. В скобках

указаны необязательные горизонты. Кроме того, для исследования структуры водных масс обычно вводят дополнительные горизонты, которые располагаются на верхней и нижней границах слоя скачка температуры и солености воды.

Стандартные и вековые океанографические разрезы выполняются не реже одного раза в сезон. Координаты станций на этих разрезах и время выполнения на морях России устанавливаются приказами Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Утвержденные сроки выполнения разрезов могут быть нарушены только по условиям погоды или в случае тяжелой ледовой обстановки.

Океанографическая съемка представляет собой совокупность разрезов и станций, выполняемых одним судном, группой судов одновременно и другими техническими средствами для получения информации о пространственном распределении океанографических характеристик в определенный период времени. Океанографические съемки производятся для исследования распределения различных гидрометеорологических элементов во всем море или отдельном районе океана для составления и уточнения морских гидрологических и рыбопромысловых прогнозов и их рекомендуется выполнять не реже одного раза в гидрологический сезон. Если же их невозможно выполнять ежесезонно, то съемки необходимо производить два раза в год.

Океанографические съемки могут быть ведомственные, ведомственно-международные и международные. Расположение разрезов при выполнении океанографических съемок и их число должны способствовать при получении результатов наблюдений отражению характеристик специфических особенностей исследуемого района. В число разрезов при океанографической съемке должны обязательно входить все стандартные и вековые океанографические разрезы, существующие в данном районе моря. Наблюдения при выполнении съемки должны быть по возможности синхронными, как и при выполнении стандартных океанографических разрезов. А с целью уменьшения времени производства наблюдений съемку следует выполнять несколькими судами одновременно.

При производстве океанографической съемки одним судном необходимо добиваться максимальной скорости работы, а число разрезов и станций на них не должно быть очень большим. В некоторых случаях допускается сокращение состава наблюдений, а при глубинах свыше 1000 м часть станций иногда делают подвесными (подвесная океанографическая станция — станция, наблюдения на которой выполняются не до дна, а до определенного горизонта).

Распределение разрезов (в какой-то мере образование замкнутых полигонов) позволяет произвести оценку степени изменчивости гидрометеорологических элементов за счет повторения океанографических станций, выполняемых в начале и конце или на пересечении разрезов. Рекомендуется также для получения возможных изменений значений гидрометеорологических элементов за период съемки в нескольких точках повторных станций поставить авто-

номные буйковые станции с автоматическими регистраторами гидрометеорологических параметров на различных горизонтах.

При выполнении океанографической съемки несколькими судами все суда делают назначенные им разрезы одновременно. Если съемка производится судами различных ведомств, условие одновременности не всегда соблюдается. В этом случае каждое судно выполняет самостоятельно выделенные ему разрезы, но при этом устанавливается общий срок для выполнения всей съемки.

За период океанографической съемки в целях изучения изменчивости гидрологических элементов во времени и в связи с обуславливающими их метеорологическими и астрономическими факторами выполняются *многочасовые* или *многосуточные гидрометеорологические наблюдения* в характерных точках с помощью установки автономных буйковых станций (АБС) или с судна, стоящего на якорь или лежащего в дрейфе. Выполнение подобных океанографических станций используется также при исследованиях ветровых и инерционных течений, приливных явлений, внутренних волн, развития и затухания ветровых волн и других океанографических параметров и, кроме того, для разработки методов океанографических расчетов и прогнозов. Продолжительность наблюдений на многосуточных станциях определяется исходя из требования, чтобы за время работ можно было наблюдать достаточное разнообразие синоптических процессов и связанных с ними значений гидрометеорологических параметров.

При выполнении многосуточных станций, если судно находится в районе постановки автономной буйковой станции (в радиусе не более 1 м. мили); с судна обязательно производятся наблюдения за ветром, вертикальным распределением температуры, солености, гидрохимических элементов, а также за другими гидрометеорологическими параметрами. В случае работы одного судна с несколькими АБС наблюдения около каждой буйковой станции выполняются при постановке, снятии и при каждой проверке работы АБС.

*Эпизодические наблюдения* выполняются по специальным программам в основном в целях получения данных о распределении комплекса гидрометеорологических элементов или какого-либо одного компонента режима моря в исследуемом районе по возможности за минимальный период времени. Подобные наблюдения чаще всего заключаются в производстве разных океанографических съемок одним или несколькими судами, а также в выполнении разовых многочасовых или многосуточных станций для изучения влияния отдельных гидрометеорологических параметров на водный режим исследуемого бассейна. Обычно эти наблюдения приурочиваются к моментам резких изменений погодных условий или состояния моря, а также при рекогносцировочных обследованиях совершенно неизученных или малоизученных районов моря. Кроме того, эпизодические наблюдения проводятся в оперативных целях для обеспечения данными гидрометеорологических наблюдений народнохозяйственных организаций и для составления океанографических расчетов, прогнозов и их проверки.

*Попутные гидрометеорологические наблюдения* проводятся регулярно в целях сбора материалов для оперативной информации о состоянии погоды и моря в районах плавания судна. Результаты наблюдений кодируются и по радио передаются в соответствующие оперативные органы Росгидромета. Попутные гидрометеорологические наблюдения выполняются торговыми и рыбопромышленными судами, кораблями и вспомогательными судами Военно-морского флота и, конечно же, всеми научно-исследовательскими судами.

*Специальные океанографические наблюдения* на полигонах проводятся в целях исследования процессов и явлений, протекающих в Мировом океане, изменчивости этих процессов во времени и пространстве. Состав этих наблюдений, сроки выполнения и их продолжительность зависят от задач исследования, а программа наблюдений составляется для каждой экспедиции, рейса. В работах на полигоне всегда участвует несколько судов. Исследования на полигонах обычно заключаются в выполнении сетки океанографических разрезов, многосуточных станций в характерных точках и постановках серии автономных буйковых станций. Кроме того, в работах на полигонах в последнее время стали широко применяться дистанционные методы зондирования океана (авиация) и космические методы исследования океана (ИСЗ и пилотируемые космические аппараты).

*Океанографические наблюдения на судах погоды*, которые являются постоянно действующими гидрометеорологическими станциями, расположенными в фиксированных районах Мирового океана, проводятся регулярно и включают в себя метеорологические, океанологические и гидробиологические наблюдения. Основная программа наблюдений на судах погоды состоит из аэрологических (иногда и ракетное зондирование атмосферы), метеорологических, батитермографических, глубоководных гидрологических, гидробиологических наблюдений, наблюдений за температурой поверхностного слоя, волнением и химическим загрязнением океанических вод. Иногда проводятся и некоторые специальные исследования, как, например, регистрация течений и волнения самописцами, геофизические наблюдения (сейсмические волны, геомагнитные явления) и др.

Каждое из судов погоды, принадлежащих различным странам, всегда располагается в заданном квадрате и сообщает регулярно гидрометеорологическую информацию, необходимую для Всемирной службы погоды (ВСП), для составления и обеспечения метеорологическими и гидрологическими прогнозами морского и рыбопромышленного флотов, полетов самолетов, а также для изучения основных закономерностей гидрометеорологических параметров во времени и пространстве и для других исследований.

## Глава 2

### МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 2.1. Основопологающие понятия и термины

В настоящем разделе рассматриваются основные понятия и термины, которые стандартизованы в государственных стандартах (ГОСТ) и руководящих документах (РД), но в силу их широкого распространения получают искаженное толкование, неправильно применяются или заменяются неправильными терминами. Не установив единства понимания таких общих терминов, практически невозможно рассматривать вопросы метрологического обеспечения океанографических измерений. Вполне естественно, что в первую очередь необходимо установить такие понятия, как метрологическое обеспечение, измерение, поверка, а также другие, определяющие их.

*Метрологическое обеспечение* — установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

*Метрология* — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

*Измерение* — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

*Физическая величина* — это свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Например: давление, скорость, температура.

*Размер физической величины* — количественное содержание общего свойства в объекте. Выразить размер величины можно с помощью любой из единиц данной величины.

*Значение физической величины* — числовая оценка размера, выраженная в виде некоторого числа единиц данной величины. Для числового значения характерно, что при применении другой единицы оно изменяется, тогда как физический размер величины остается неизменным.

*Единица физической величины* — физическая величина, которой по определению придано значение, равное единице. Например: единица длины метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени  $1/299792458$  с, а единица температуры кельвин есть единица термодинамической температуры, равная  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки чистой воды.

Система единиц физических величин — совокупность основных и производных единиц, образованная в соответствии с принятыми принципами для заданной системы физических величин. Основные единицы Международной системы единиц (СИ): метр (м), килограмм (кг), секунда (с), ампер (А), кельвин (К), моль (моль) и кандела (кд).

Из сочетаний основных единиц образуются производные единицы, например единица скорости — метр в секунду (м/с). Путем прибавления к основным единицам установленных приставок образуются кратные (например, километр) или дольные (например, микрометр) единицы. Основопологающим нормативно-техническим документом по единицам физических величин, устанавливающим обязательное применение Международной системы единиц, является ГОСТ 8.417–81.

*Размерность физической величины* — выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающего связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе единиц за основные, и с коэффициентом пропорциональности, равным единице. Так, в базис размерной системы единиц, охватываемой Международной системой единиц (СИ), входят размерности: длины  $L$ , массы  $M$ , времени  $T$ , силы электрического тока  $I$ , температуры  $\theta$ , количества вещества  $N$  и силы света  $J$ . В системе величин  $LMT$  размерность ( $\dim$ ) величин  $X$  будет:

$$\dim X = L^l M^m T^t,$$

где  $L, M, T$  — символы величин, принятых за основные (соответственно длины, массы, времени и т. д.);  $l, m, t$  — целые или дробные, положительные или отрицательные вещественные числа, которые являются показателями размерности.

Над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня. Действия сложения и вычитания размерностей не имеют смысла. Размерность величины одновременно является размерностью ее единицы. Следует уяснить разницу между размером величины и размерностью. Размерность дает представление о виде, о природе величины, о соотношении какой-то величины с другими, единицы которых мы принимаем за основные, т. е. является качественной характеристикой. Размер определяет количественное содержание величины или единицы, т. е. является количественной характеристикой. В принципе выражение размерности может быть применено при любой системе единиц.

## 2.2. Метрологическое обеспечение, его основы, правила и нормы

Как следует из определения, научной основой метрологического обеспечения является метрология.

Техническими основами метрологического обеспечения являются:

- система государственных эталонов единиц физических величин, обеспечивающая воспроизведение единиц с наивысшей точностью;
- система передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений с помощью средств поверки;
- система государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованны-



ми методиками измерений, эталонами и соблюдением метрологических правил и норм;

- система испытаний и утверждения типа средств измерений;
- система обязательной поверки и калибровки средств измерений;
- система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, обеспечивающая воспроизведение единиц величин, характеризующих состав и свойства веществ и материалов;

- система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов, обеспечивающая достоверными данными научные исследования, разработку технологических процессов и конструкций изделий, процессов получения и использования материалов.

Организационной основой метрологического обеспечения являются метрологические службы государственных органов управления и юридических лиц.

Общие правила и нормы метрологического обеспечения устанавливаются в стандартах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), которая представляет комплекс установленных стандартами взаимоувязанных правил, положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений. Основными объектами стандартизации ГСИ являются:

- единицы физических величин;
- государственные эталоны и поверочные схемы;
- методы и средства поверки средств измерений;
- номенклатура нормируемых метрологических характеристик средств измерений;

- нормы точности измерений;
- способы выражения и формы представления результатов измерений и показателей точности измерений;

- методики выполнения измерений;
- методики оценки достоверности и формы представления данных о свойствах веществ и материалов;

- требования к стандартным образцам состава и свойств веществ и материалов;

- типовое положение о метрологической службе государственных органов управления Российской Федерации и юридических лиц;

- порядок осуществления государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами и соблюдением метрологических правил и норм;

- порядок лицензирования деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений;

- порядок проведения поверки средств измерений;

- порядок аккредитации головных и базовых организаций метрологических служб государственных органов управления Российской Федерации и объединений юридических лиц;

- порядок проведения испытаний и утверждения типа средства измерений;

- порядок аттестации поверителей средств измерений;

- порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц;
- термины и определения в области метрологии.

В соответствии с Законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» гидрометеорологические работы отнесены к сферам распространения государственного метрологического контроля и надзора. В связи с этим вся деятельность по метрологическому обеспечению океанографических измерений регламентируется соответствующими правилами по метрологии и методическими инструкциями. В частности, при выполнении работ в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора необходимо:

- создать метрологические службы или иные организационные структуры по обеспечению единства измерений;
- аккредитовать метрологические службы юридических лиц на право поверки;
- аттестовать физические лица в качестве поверителей средств измерений;
- провести испытания средств измерений с последующим утверждением типа;
- поверить органами Государственной метрологической службы средства измерений при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту и эксплуатации;
- аттестовать методику выполнения измерений (МВИ).

### 2.3. Измерение. Виды измерений

Измерение физической величины предполагает совокупность операций, заключающихся в сравнении (в явном или неявном виде) измеряемой величины с единицей для получения значения этой величины (или информации о ней) в форме, наиболее удобной для использования. Иными словами, измерение некоторой физической величины производят с помощью технического средства, хранящего единицу физической величины, путем ее сравнения в ходе физического эксперимента с величиной, принятой за единицу физической величины. Результатом измерения будет именованное число, показывающее соотношение измеряемой величины с единицей физической величины.

Классификация видов измерений обычно осуществляется по характеру зависимости измеряемой величины от времени, по способам получения результатов измерений и по способам выражения результатов этих измерений, а также по характеристике точности (равноточные, неравноточные), по числу измерений в ряду измерений (однократные, многократные), по метрологическому назначению (технические, метрологические).

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на:

- статические, при которых измеряемая величина принимается в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения;
- динамические, в процессе которых измеряемая величина изменяется.

Следует отметить, что для океанографических измерений эти понятия достаточно условны и зависят от принятых масштабов изучаемой среды и метрологических характеристик средств измерений.

По способу получения результата измерения, т. е. числового значения измеряемой величины, все измерения делят на четыре основных вида: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

*Прямыми* называют измерения, заключающиеся в экспериментальном сравнении измеряемой величины с мерой этой величины или в отсчете показаний средства измерений, непосредственно дающего значение измеряемой величины. Например, измерения температуры термометром, длины мерной лентой или блок-счетчиком, давления манометром.

*Косвенными* называют измерения, результат которых определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Например, измерение мощности электрического тока по результатам измерения напряжения и силы тока или измерение солености морской воды по результатам измерения температуры, электрической проводимости морской воды и гидростатического давления.

*Совокупными* называют производимые одновременно измерения двух или нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин. Например, измерения, при которых массы отдельных гирь набора находят по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь.

*Совместными* называют производимые одновременно (прямые или косвенные) измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними. Например, совместными являются измерения температуры и гидростатического давления, производимые для определения температурной зависимости измерителя давления.

По способу выражения результатов измерений различают абсолютные и относительные измерения.

*Абсолютными* называют измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) на использовании значений физических констант. Например, измерение силы  $F$  основано на измерении основной величины — массы  $m$  и использовании физической постоянной — ускорения свободного падения тела  $g$  в данной точке в соответствии с уравнением  $F = mg$ . Измерения относительной электрической проводимости  $R$  морской воды с помощью СТД-зондов, отградуированных в значениях удельной электрической проводимости, являются абсолютными, поскольку для определения относительной электрической проводимости  $R$  используется постоянное значение удельной электрической проводимости стандартного образца — «нормальной» морской воды при  $15^\circ\text{C}$ . Однако следует учитывать, что это значение не стандартизировано и в литературе можно встретить различные значения этой постоянной. В частности, в зарубежной практике удельной электрической про-

водимости стандартного образца «нормальной» морской воды при 15 °С приписывается значение 4,2914 См/м.

*Относительными* называют измерения отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную. Относительными являются измерения относительной электрической проводимости морской воды  $R_t$ , проводимые с помощью электросолемера типа ГМ-65 или Autosol при измерении солености морской воды. По принципу действия вышеуказанные солемеры проводят измерения относительно стандартного образца — «нормальной» морской воды по ГСО 5494-90 по его нормированному значению  $R_{15}$ .

## 2.4. Принципы, методы и методики измерений

Каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, в основу которых положены различные физические принципы, технические и методические особенности.

*Принцип измерений* — это физическое явление или эффект, положенные в основу измерений тем или иным типом средств измерений. Например, применение эффекта Доплера для измерения скорости.

*Метод измерений* — прием или совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Для прямых измерений можно выделить несколько основных методов: непосредственной оценки, сравнения с мерой, дифференциальный, нулевой и совпадения. При косвенных измерениях широко применяют преобразование измеряемой величины в процессе измерений.

*Метод непосредственной оценки* дает значение измеряемой величины непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. Например, измерение температуры с помощью ртутных термометров.

*Метод сравнения с мерой* — метод, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

*Нулевой метод измерений* — метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Например, измерения электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием.

*Дифференциальный метод* — метод, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, при котором измеряется разность между этими двумя значениями. Дифференциальный (разностный) метод позволяет получать результаты с высокой точностью даже при применении относительно грубых средств для измерения разности. Однако использование этого метода возможно только при условии воспроизведения с большой точностью известной величины, значение которой близко к значению измеряемой. Это во многих случаях оказывается легче, чем изготовить средство измерений высокой точности.

*Методика выполнения измерений (МВИ)* — это установленная совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение необходимых результатов измерений в

соответствии с данным методом. Обычно методика измерений регламентируется каким-либо руководящим документом. В документах, регламентирующих МВИ, в общем случае указывают: назначение МВИ; условия измерений; требования к погрешности измерений или (и) приписанные характеристики погрешности измерений; метод (методы) измерений; требования к средствам измерений (в том числе к стандартным образцам, аттестованным смесям), материалам, растворам или указывают типы средств измерений, их характеристики и обозначения документов, где приведены требования к средствам измерений (ГОСТ, ТУ и другие документы); операции при подготовке к выполнению измерений; операции при выполнении измерений; операции обработки и вычислений результатов измерений; требования к оформлению результатов измерений; требования к квалификации операторов; требования к обеспечению безопасности выполнения работ; требования к обеспечению экологической безопасности; другие требования и операции (при необходимости). Общие положения и требования к разработке, аттестации, стандартизации и метрологическому надзору за МВИ установлены в ГОСТ Р 8.563-96.

## 2.5. Эталоны, шкалы, стандартные образцы

*2.5.1. Воспроизведение, хранение и передачу размеров единиц осуществляют с помощью эталонов. В Законе РФ «Об обеспечении единства измерений» дано следующее определение эталона:*

— «*эталон единицы величины — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных либо дольных значений единицы величины) с целью передачи ее размера другим средствам измерений данной величины;*

— *государственный эталон единицы величины — эталон единицы величины, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории Российской Федерации».*

Государственные эталоны бывают двух видов: *первичные*, воспроизводящие единицу в соответствии с ее определением с наивысшей в стране точностью, и *специальные*, обеспечивающие воспроизведение единицы в особых условиях и служащие для этих условий первичным эталоном.

В метрологической практике большое распространение, особенно в связи с Законом «Об обеспечении единства измерений», имеют вторичные эталоны, значение которых устанавливается по первичным эталонам. По своему метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на: эталоны-свидетели, предназначенные для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты; эталоны-копии, предназначенные для передачи размера единицы рабочим эталонам; эталоны сравнения, применяемые для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом, и рабочие эталоны, применяемые для передачи размера единицы рабочим

средствам измерений. Следует отметить, что Законом «Об обеспечении единства измерений» упразднено понятие «образцовые средства измерений», с помощью которых передавался размер единицы рабочим средствам измерений и которые являлись промежуточным звеном между рабочими эталонами и рабочими средствами измерений.

**2.5.2. Шкала физической величины** — это упорядоченная последовательность значений физической величины, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. В зависимости от свойств аддитивности физической величины принципы построения шкал существенно различаются между собой. Аддитивность свойств физических величин предполагает возможность суммирования, умножения на числовой коэффициент, деления друг на друга разных значений физической величины. Считая размеры единицы одинаковыми по всей шкале, значение аддитивной величины находят как произведение единицы физической величины на числовое значение величины в принятой единице. Таким образом, для измерений аддитивных величин достаточно выбрать единицы и проградировать в них средства измерений. Для неаддитивной физической величины умножение на числовой коэффициент или деление друг на друга ее значений не имеет физического смысла. Шкала значений неаддитивных величин строится на ряде опорных значений (реперных точек), принимаемых условно (обычно по соглашению), значения между ними находятся интерполяцией. Это означает, что для измерений неаддитивных величин недостаточно выбрать единицу, необходимо также принять ряд исходных значений для построения шкалы измерений. К таким шкалам, например, относятся различные температурные шкалы и шкала практической солености. В частности, абсолютная термодинамическая температурная шкала основана на значении абсолютного нуля — начало отсчета — и значении одной практически реализуемой реперной точки. В качестве реперной точки выбрана тройная точка воды с приписанным ей значением 273,16 К (0,01 °C) точно. Международная практическая температурная шкала 1968 г. МПТН-68 в диапазоне температур от 18,81 до 903,89 К воспроизводится с помощью ряда основных реперных точек и платинового термометра сопротивления в качестве эталонного интерполяционного прибора. Международная температурная шкала 1990 г. в диапазоне температур от 18 до 1234,98 К также воспроизводится с помощью ряда основных реперных точек и платинового термометра сопротивления в качестве эталонного интерполяционного прибора.

Шкала практической солености 1978 г. ИПС-78 (ГОСТ 77-84) воспроизводится в одной точке через отношение  $K_{15}$  электропроводности пробы морской воды при температуре 15 °C и давлении в 1 стандартную атмосферу (1 ст. атм. = 101 325 Па) к электропроводности раствора KCl, в котором массовая доля KCl составляет  $32,4356 \cdot 10^{-3}$ , при тех же значениях температуры и давления и с помощью соответствующих интерполяционных формул. Значение  $K_{15}$ , в точности равное 1, соответствует значению практической солености  $S$ , в точности равному 35 практическим единицам солености (п. е. с.). Интерполяционные формулы определяют зависимость между практической соленостью  $S$  и нормированными значениями относительной

электрической проводимости морской воды. В качестве нормирующих значений принимаются значения удельной электрической проводимости стандартного раствора морской воды  $S = 85$  («нормальная» морская вода по ГСО 5494-90) при различных значениях температуры морской воды и гидростатического давления.

**2.5.3. Стандартный образец (СО)** состава и свойств веществ и материалов — средство измерения в виде вещества (материала), состав или свойство которого установлены при аттестации. Стандартные образцы предназначены для обеспечения единства и требуемой точности измерений посредством:

- градуировки, аттестации и поверки средств измерений;
- аттестации методик выполнения измерений;
- контроля правильности результатов измерений;
- измерения состава и свойств веществ и материалов методами сравнения.

В зависимости от специфики аттестуемой характеристики стандартные образцы подразделяются на стандартные образцы состава и стандартные образцы свойств. Стандартные образцы свойств веществ и материалов по своему назначению выполняют роль мер.

В зависимости от установленного порядка утверждения стандартные образцы подразделяются на государственные стандартные образцы (ГСО), отраслевые стандартные образцы (ОСО) и стандартные образцы предприятий (СОП).

В настоящее время непосредственно в океанографической практике применяется государственный стандартный образец ГСО 5494-90 «нормальная» морская вода. «Нормальная» морская вода применяется для воспроизведения реперной точки в Международной шкале практической солености ШПС-78, для калибровки, градуировки и поверки солемеров и гидрологических зондов, СТД-систем. «Нормальная» морская вода изготавливается в Англии и в аналитической лаборатории Института океанологии (ИО РАН). Метрологическими характеристиками «нормальной» морской воды по ГСО 5494-90 являются значения относительной электрической проводимости при температуре  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  —  $R_{15}$  — и хлорности. В 1996 г. аналитическая лаборатория ИО РАН аттестовала стандартные образцы растворов морской воды для промежуточных значений солености 10, 20, 30 и 38 п. е. с., обозначенных соответственно С 1—10+С 1—38 и включенных в реестр ГСО РГ 0401-96+0404-96. Аттестуемыми характеристиками этих растворов являются значения солености  $S$  и относительной электрической проводимости  $R_t$  при температурах 15, 18, 21, 24, 27 и 30  $^{\circ}\text{C}$ .

## 2.6. Передача размера единицы, поверочная схема

**Передача размера единицы** — приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством, к размеру единицы, воспроизводимой эталоном, которое осуществляется при их сравнении (поверке).

Система передачи размера единицы физической величины от государственного эталона рабочим средствам измерений устанавли-

вается поверочными схемами. Поверочная схема — это нормативно-технический или технический документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности при передаче, утвержденный в установленном порядке. В зависимости от области распространения поверочные схемы подразделяют на следующие виды: государственные, ведомственные и локальные. Государственная поверочная схема распространяется на все средства измерений данной физической величины, применяемые в стране. Соответственно ведомственная или локальная поверочная схема распространяется на средства измерений, подлежащие поверке внутри ведомства или в данном органе метрологической службы. Поверочная схема должна включать не менее двух ступеней передачи размера единицы. Основные требования к содержанию и построению поверочной схемы устанавливаются в стандартах ГСИ. Государственные стандарты, устанавливающие государственную поверочную схему, должны состоять из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу. Ведомственную и локальную поверочные схемы оформляют в виде чертежа. Допускается дополнять чертеж текстовой частью.

На чертеже поверочной схемы должны быть указаны: наименования средств измерений и методов поверки; номинальные значения или диапазоны значений физических величин; допускаемые значения погрешностей средств измерений; допускаемые значения погрешностей методов поверки. Чертеж поверочной схемы должен состоять из полей, расположенных друг под другом и разделенных штриховыми линиями. Число полей зависит от структуры поверочной схемы. Поля должны иметь наименования: «Эталоны» или «Государственный эталон» (если вторичные эталоны отсутствуют) и «Рабочие средства измерений». Наименования полей указывают в левой части чертежа, отделенной сплошной вертикальной линией. Верхнее поле государственной поверочной схемы возглавляется государственным эталоном. Под этим полем указывают наименования эталонов в порядке их соподчиненности. Под нижним полем эталонов помещают поле рабочих средств измерений. Под наименованиями эталонов и рабочих средств измерений указывают номинальные значения или диапазоны значений физических величин и значения их погрешности.

Методы поверки средств измерений, указываемые на поверочной схеме, с целью унификации должны соответствовать одному из следующих общих методов: непосредственное сличение (т. е. без средств сравнения); сличение с помощью компаратора (т. е. с помощью средств сравнения); метод прямых измерений; метод косвенных измерений. При указании метода поверки в текстовой части допускается отражать специфику поверки средств измерений. Если при поверке проводят градуировку средств измерений, это указывают в тексте. Под наименованием метода поверки указывают допускаемое значение погрешности метода поверки. Способы графического изображения ступени передачи размера единицы указаны в ГОСТ 8.061-80.



## 2.7. Поверка и калибровка средств измерений

В Законе РФ «Об обеспечении единства измерений» даны определения понятий поверки и калибровки, которые отличаются от ранее принятых. В соответствии с Законом «поверка средства измерений — совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям; калибровка средства измерений — совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего государственно-му метрологическому контролю и надзору».

Таким образом, в соответствии с Законом различие между поверкой и калибровкой заключается только лишь в сфере применения средств измерений. Одни и те же типы средств измерений могут быть поверены или откалиброваны при одной и той же совокупности операций.

Порядок выполнения совокупности операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик, их соответствия установленным техническим требованиям и (или) пригодности к применению средства измерений регламентируется правилами по метрологии ПР50.2.006-94 «ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения» и методиками поверки средств измерений, разрабатываемыми для конкретных типов средств измерений. Основные требования к построению, содержанию и изложению методик поверки установлены в государственных стандартах системы стандартизации и системы обеспечения единства измерений. В соответствии с инструкцией РД 50-660-88 «Документы на методики поверки средств измерений» стандарт на методику поверки должен содержать вводную часть и следующие разделы: операции поверки; средства поверки; требования безопасности; условия поверки; подготовка к поверке; проведение поверки; обработка результатов наблюдений; оформление результатов поверки. Если к квалификации поверителей предъявляют особые требования, после раздела «Средства поверки» в документы по поверке включают раздел «Требования к квалификации поверителей». В обоснованных случаях допускается объединять или исключать отдельные разделы. Документы по поверке могут содержать приложения.

В вводной части устанавливается назначение документа по поверке, а также уточняют объект стандартизации и степень соответствия документа по поверке соответствующим документам международных организаций. Разделы документа по поверке содержат соответственно перечни операций по поверке, эталонов и вспомогательных средств поверки с указанием нормативно-технических документов, регламентирующих технические требования и (или) метрологические характеристики этих средств, физических величин, влияющих на метрологические характеристики поверяемых средств измерений,

с указанием номинальных значений влияющих величин и допускаемых значений пределов отклонений от номинальных значений, работ, которые проводят перед поверкой, и способов их выполнения. Раздел «Проведение поверки» содержит подразделы: внешний осмотр; опробование; определение (контроль) метрологических характеристик. В этих подразделах соответственно указывают перечень требований к поверяемым средствам измерений в части комплектации и внешнего вида, перечень и описание операций, которые необходимо провести с использованием или без использования средств измерений для поверки действия поверяемого средства измерения или его составных частей, описание операций, указанных в разделе «Операции поверки», и наиболее рациональные методы определения метрологических характеристик. Описание операции содержит наименование и метод поверки, схемы подключения, указания о порядке проведения операций и предельно допускаемой погрешности отсчета.

Результаты поверки оформляются свидетельством о поверке или извещением о непригодности поверяемого средства измерений.

В соответствии с ПР 50.2.006-94 средства измерений подвергаются первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной поверке. Первичной поверке подлежат средства измерений утвержденных типов при выпуске из производства и ремонта, при ввозе по импорту. Периодической поверке подлежат средства измерений, находящиеся в эксплуатации или на хранении, через определенные межповерочные интервалы. Периодическую поверку должен проходить каждый экземпляр средства измерений. Периодической поверке могут не подвергаться средства измерений, находящиеся на длительном хранении. Внеочередную, инспекционную и экспертную поверки проводят при специально оговоренных случаях. Результаты этих поверок отражают в соответствующих актах поверки или в заключении экспертной поверки.

## 2.8. Погрешности измерений

*Погрешности измерений* — это отклонения результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Как бы тщательно не проводилось измерение, какие бы точные средства измерений не применяли, какими бы методами и приемами измерений не пользовались, никогда нельзя узнать истинного (действительного) значения измеряемой величины, можно только лишь уменьшить значение погрешности измерений. Погрешность измерений представляет собой сумму целого ряда составляющих, каждая из которых имеет свою причину, обусловленную свойствами измеряемого объекта и средства измерений, внешними воздействиями на измеряемый объект и средства измерений, квалификацией и состоянием оператора и т. п.

В зависимости от формы выражения различают абсолютную и относительную погрешности измерений.

**Абсолютной** называют погрешность измерений  $\Delta$ , вычисленную в тех же единицах, что и измеряемая величина, по формуле

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}},$$

где  $x_{\text{изм}}$  — результат измерения;  $x_{\text{д}}$  — действительное (истинное) значение измеряемой величины.

**Относительная** погрешность  $\delta$  представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному (действительному) значению измеряемой величины и выражается в процентах или долях измеряемой величины. Относительную погрешность находят из отношений:

$$\delta = \Delta/x_{\text{д}} \text{ или } \delta = (\Delta/x_{\text{д}}) \cdot 100 \text{ \%}.$$

В зависимости от условий и режимов измерения различают статическую и динамическую погрешности.

**Статической** называют погрешность, не зависящую от скорости изменения измеряемой величины во времени.

**Динамической** называют погрешность, зависящую от скорости изменения измеряемой величины во времени.

В зависимости от характера проявления, возможностей устранения и причин возникновения различают систематическую и случайную погрешности.

**Систематической**  $\Delta_{\text{с}}$  называют составляющую погрешности измерений, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины.

**Случайной**  $\Delta'$  называют составляющую погрешности измерений, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

В МИ 1317-86 «ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров» определены следующие группы характеристик погрешностей измерений:

- задаваемые в качестве требуемых или допускаемых — нормы характеристик погрешностей измерений или, кратко, нормы погрешностей измерений;

- приписываемые совокупности измерений, выполняемых по определенной (стандартизированной или аттестованной) методике, — приписанные характеристики погрешности измерений;

- отражающие близость отдельного, экспериментально уже полученного результата измерения к истинному значению измеряемой величины — статистические оценки характеристик погрешностей измерений или, кратко, статистические оценки погрешностей измерений.

При массовых технических измерениях применяются в основном нормы погрешностей измерений, а также приписанные характеристики погрешности измерений. Они представляют собой вероятностные характеристики (характеристики генеральной совокупности) случайной величины — погрешности измерений.

При измерениях, выполняемых при проведении научных исследований и метрологических работ, часто применяются статистические оценки погрешности измерений. Они представляют собой статисти-

стические (выборочные) характеристики случайной величины — погрешности измерений.

В качестве вероятностных и статистических характеристик погрешности измерений используются: среднее квадратическое отклонение погрешности измерений или границы, в пределах которых погрешность измерений находится с заданной вероятностью, или характеристики случайной и систематической составляющих погрешности измерений.

Математическое ожидание погрешности измерений представляет собой систематическую погрешность, и если ее значение известно и постоянно, то на нее в результат измерений вводится поправка. В других случаях используются характеристики неисключенной систематической погрешности.

В качестве характеристик случайной составляющей погрешности используются: среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерений (предел допускаемых значений, наибольшее возможное значение или оценка в зависимости от характеристик погрешности измерений) и (при необходимости) нормализованная автокорреляционная функция случайной составляющей погрешности измерений или характеристики этой функции.

В качестве характеристик систематической составляющей погрешности измерений используются:

- среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической составляющей погрешности измерений;

- границы, в которых неисключенная систематическая составляющая погрешности измерений находится с заданной вероятностью (в частности, с вероятностью, равной единице).

При необходимости средние квадратические отклонения составляющих погрешности измерений сопровождаются указанием принятой аппроксимации закона распределения вероятностей погрешности или его качественным описанием (например, симметричный, одномодальный и т. п.).

## 2.9. Погрешности средств измерений

Погрешности измерений определяются главным образом погрешностями средств измерений, но они не тождественны им. По происхождению различают инструментальные и методические погрешности. Инструментальные погрешности обусловлены прежде всего особенностями используемых в средствах измерений принципов и методов измерений, а также схемным, конструктивным и технологическим несовершенством средств измерений. К инструментальным погрешностям относится погрешность средств измерений в рабочих условиях, включающая в себя основную, дополнительные (из-за влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала) и динамическую погрешности. Инструментальные погрешности данного средства измерений определяются при его испытании и указываются в технической документации (паспорте, формуляре, свидетельстве о поверке и др.). Методические погрешности обуслов-

лены неадекватностью принимаемых моделей реальным объектам, несовершенством методов измерений, неопределенностью объекта измерения, упрощением зависимостей, положенных в основу измерений, а также взаимным влиянием средства измерений, объекта исследования и экспериментатора.

В общем виде *погрешность средства измерений* — это отклонение его реальной функции преобразования от номинальной. Если реальная характеристика смещена относительно номинальной на одну и ту же величину при всех значениях преобразуемой величины, то такая погрешность называется аддитивной, или погрешностью нуля. В случае, если она является систематической, то может быть скорректирована смещением шкалы или нулевого положения указателя. Если же отклонения реальной характеристики от номинальной пропорциональны текущему значению преобразуемой величины, то такая погрешность называется мультипликативной, или погрешностью чувствительности. Разделение погрешностей на мультипликативные и аддитивные весьма существенно при решении вопроса о нормировании погрешностей средства измерений, о выборе метода оптимальной обработки получаемой информации о значении измеряемой величины. Если средству измерений присуща только аддитивная погрешность или она существенно превышает другие составляющие, то погрешности средств измерений целесообразно нормировать абсолютной погрешностью. Мультипликативная погрешность увеличивается с увеличением измеряемой величины, поэтому ее относительное значение остается постоянным во всем диапазоне. Погрешность средства измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью целесообразно нормировать в виде относительной погрешности.

*Приведенная погрешность средства измерений* — относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерений отнесена к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Условно принятое значение величины называют нормирующим значением. Часто за нормирующее значение принимают верхний предел измерений. Приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

*Основная погрешность средства измерений* — погрешность средства измерений, определяемая в нормальных условиях его применения.

*Дополнительная погрешность средства измерений* — составляющая погрешности средства измерений, дополнительно возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

*Динамическая погрешность средства измерений* — погрешность средства измерений, возникающая дополнительно при измерении переменной физической величины и обусловленная несоответствием его реакции на скорость (частоту) изменения входного сигнала.

## Глава 3

### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА

#### 3.1. Звуковое поле в океане

При распространении звука в океане всегда в большей или меньшей степени принятый сигнал по интенсивности или фазе отличается от излученного. Кроме того, даже если из одного и того же места, но в разное время излучаются одинаковые сигналы, то в место приема будут приходить разные сигналы. Все это вызвано тем, что параметры среды, в которой распространяются звуковые волны, изменяются, причем в очень больших пределах, и во времени и в пространстве. Поверхностное волнение океана представляет нам верхнюю границу воды как статистически неровную, изменяющуюся во времени. Влияние турбулентных процессов в океане определяет поле скорости звука (показателя преломления) как случайное. Внутренние волны приводят к добавочному возмущению этого поля и еще более усложняют условия распространения звука. Во многих случаях существенное влияние на структуру звукового поля в океане оказывают неровная граница слоисто-неоднородного грунта и океанические течения, переносящие случайные неоднородности водной среды. Рассеяние звука на неоднородностях водной толщи и ее границах вызывает флуктуации параметров распространяющихся в океане звуковых сигналов, ослабляет когерентную составляющую поля, а также приводит к перераспределению энергии звукового поля в пространстве.

Таким образом, наиболее характерной особенностью океана как акустической среды является его неоднородность. Можно отметить два типа неоднородностей: регулярные и случайные, существенно влияющие на звуковое поле в океане. Так, например, регулярное изменение скорости обуславливает рефракцию акустических лучей в океане, приводит к образованию подводного звукового канала — уникального природного явления, способствующего сверхдальному распространению звука. Случайные неоднородности водной среды и неровности ее границ вызывают рассеяние звуковых волн. Все это приводит к возникновению пространственно-временных флуктуаций интенсивности и фазы распространяющихся звуковых сигналов, к изменению и спектральных, и корреляционных характеристик.

Следует отметить, что распределение скорости звука в океане отличается относительно малой изменчивостью в горизонтальном направлении и значительными изменениями по вертикали. Вертикальные градиенты скорости звука зачастую примерно на три порядка превышают горизонтальные. Правда, эти выводы не касаются, например, фронтальных зон струйных течений и некоторых других специфических районов, имеющих локальное распространение. При

этом необходимо заметить, что вид (профиль) кривой вертикального распределения скорости звука в каждой точке океана и особенно распределение градиента скорости звука по глубине, при прочих равных условиях, во многом определяют дальность распространения звукового сигнала, т. е. определяют характеристики подводного звукового канала. При одном профиле дальность распространения звука может достигать сотен и даже тысяч километров, а при другом профиле звук той же частоты имеет дальность распространения всего лишь единицы или десятки километров.

Для глубоководных районов океана типичным является такой профиль, когда на некоторой глубине (обычно 1000—1200 м) наблюдается минимум скорости звука, обусловленный зависимостью свойств океана от температуры воды и гидростатического давления. Эта глубина называется осью подводного звукового канала (ПЗК). При направлении от нее вверх скорость звука растет в основном из-за повышения температуры, а при направлении вниз — из-за увеличения гидростатического давления. Если источник звука расположен на оси ПЗК или вблизи нее, то часть звуковых волн оказывается «захваченной» ПЗК и распространяется в нем, не касаясь ни дна, ни поверхности океана, т. е. не испытывает рассеяния и поглощения на его границах.

### 3.2. Область применения

Для чего же нужно исследование распространения звука в океане. Это, конечно же, эхолотирование, определение структуры дна с помощью профилографов подводных слоев, установление характера рельефа дна. Кроме того, в навигации используется акустический метод измерения скорости судна по значению доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала. Рыбопоисковые и промысловые суда оборудуются специальными эхолотами и гидролокаторами для поиска и оконтуривания рыбных скоплений. Гидроакустический канал связи используется для передачи информации и кодированных сигналов. Акустические датчики обеспечивают работу подводных буровых установок.

Довольно широк диапазон использования звука в военных целях. Здесь и шумопеленгование — прослушивание шумов кораблей с помощью гидрофонных антенн, установленных на корабле или на дне, на большом удалении от шумящего объекта; использование акустических мин, чувствительных к собственному звуковому излучению корабля; активные и пассивные самонаводящиеся акустические торпеды — пассивные реагируют на шумы корабля цели, а активные сами излучают акустические сигналы и ориентируются на отраженный импульс; гидроакустические станции миноискания (поиск объектов) используют высокие частоты и короткие импульсы, что позволяет обнаруживать объекты небольших размеров на фоне помех, и т. д.

Используется звук и для исследования процессов, протекающих в Мировом океане. На основе данных прямых измерений скорости звука можно рассчитать значения ряда гидрофизических параметров: со-

лености, плотности, сжимаемости, вязкости, гидростатического давления, характеристик течения, поверхностного волнения, грунтов океана. Информация о пространственно-временной изменчивости скорости звука позволяет обнаруживать и изучать вертикальную и горизонтальную микроструктуру водных масс, турбулентность и внутренние волны.

Для того чтобы использовать звук в качестве инструмента при изучении моря, необходимо знать скорость его распространения, коэффициент его затухания, представлять себе, каким образом звук огибает препятствия и проникает в зону тени, как он отражается и рассеивается на границах и как проходит через них. Все эти акустические явления зависят от физических характеристик толщи океана, его поверхности и дна.

Важнейшим акустическим параметром океана является скорость звука. Под скоростью звука в воде принято понимать скорость распространения в воде упругих гармонических колебаний малой (не конечной) амплитуды с длиной волны много меньше линейных размеров водоема. Скорость звука в морской воде существенно зависит от гидрологических условий и в среднем, как правило, меняется в диапазоне 1450—1600 м/с. Но в ряде районов Мирового океана могут наблюдаться и значительные отклонения. Так, например, на глубинах свыше 2000 м в Красном море скорость звука может превосходить 1700 м/с, а в Финском заливе Балтийского моря зимой может уменьшаться до 1400 м/с.

Скорость звука можно определить либо непосредственным измерением ее с помощью специальных приборов, опускаемых на заданный горизонт, либо косвенным путем — вычислением по эмпирическим формулам, отражающим ее зависимость от температуры, солености и гидростатического давления.

### 3.3. Прямые методы измерения скорости звука

Прямые натурные измерения скорости звука производятся с помощью специальных устройств, измеряющих время, необходимое для распространения импульса очень высокой частоты (порядка 1 МГц) вдоль короткого пути (порядка десятков сантиметров). Одни из первых измерений скорости звука в воде, вероятно, были выполнены Дж. Колледоном и Дж. Штурмом в ноябре 1826 г. на Женевском озере в Швейцарии. В этом эксперименте в качестве источника звука служил подводный колокол. Одновременно с ударом колокола осуществлялась вспышка пороха. Наблюдатель с трубкой прослушивания, находившийся во второй шлюпке на расстоянии 13,487 км от первой с колоколом, фиксировал время между вспышкой света и приемом звука колокола. Среднее из нескольких наблюдений дало значение 9,4 с. Температура воды была 8 °С. Таким образом, измеренная скорость звука в пресной воде при температуре 8 °С оказалась равной 1435 м/с.

И в настоящее время принцип измерения скорости звука в основном заключается в том, что тем или иным образом определяется время прохождения сигналом некоторого фиксированного рас-



стояния (базы измерения) в исследуемой среде. При этом измеряемое значение скорости звука  $c$  вычисляются по формуле

$$c = L/t,$$

где  $L$  — база измерений;  $t$  — время прохождения сигнала. Обобщенная блок-схема приборов для измерения времени  $t$  представлена на рис. 8.1.

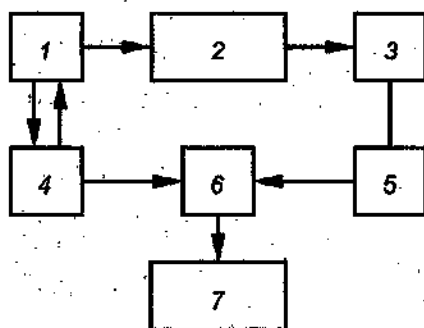


Рис. 8.1. Обобщенная блок-схема измерителей скорости звука.

1 — излучатель; 2 — среда; 3 — приемник; 4 — преобразователь сигнала излучателя; 5 — преобразователь сигнала приемника; 6 — сравнивающее устройство; 7 — регистратор.

Как правило, измерительные преобразователи конструктивно представляют собой несущую жесткую конструкцию, задающую базу измерения, на которой расположены излучатель и приемник сигнала. Излучатели и приемники обычно выполнены на основе пластин из пьезокерамики и герметично заделаны в ультразвуковые головки. Эти головки, иногда вместе с устройством подстройки, прочно крепятся на жестком основании. Расстояние между излучателем и приемником задает базу измерения. Электронный блок или конструктивно совмещается с преобразователями, или соединяется с ним высокочастотными кабелями. Размер базы измерения колеблется обычно от 1 см до 1 м.

Диапазон используемых частот лежит в пределах 11 кГц—10 МГц и зависит от свойств исследуемой среды. Применение более низких частот нецелесообразно из-за малой чувствительности измерений и чрезмерного увеличения размеров излучателей и приемников. Увеличение рабочих частот ограничивается наличием нелинейных эффектов при прохождении сигнала через среду. Например, для воды верхний диапазон частот лежит в пределах 5—10 МГц.

В настоящее время существует большое число методов измерения скорости звука, основанных на разных принципах. Среди разработанных и апробированных методов можно выделить несколько самых распространенных: импульсные, резонансные, фазовые, доплеровские и неконтактные.

*Импульсно-циклический метод* используется наиболее широко. Впервые он был реализован в 1952 г. Национальным бюро стандартов США. Сущность его заключается в следующем.

Прибор (рис. 8.2) состоит из импульсного генератора (1), излучателя (2), приемника-преобразователя (3), усилителя сигналов (4) и частотомера (5). Импульс от задающего генератора ударно возбуждает излучатель, короткий акустический сигнал проходит фиксированное рас-

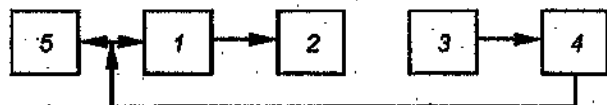


Рис. 8.2. Блок-схема импульсно-циклического измерителя.

Усл. обозначения см. текст.

стояние до приемника, там преобразуется в электрический сигнал, усиливается и снова подается на генератор для возбуждения следующего импульса, после чего весь цикл повторяется. Вся система прибора представляет собой электроакустическое кольцо, в котором через исследуемую среду проходят последовательные импульсы. Частота их следования  $F$  зависит от скорости звука и базы прибора. Время задержки  $t_s$  (время прохождения сигналом базы прибора)

$$t_s = L/c,$$

а частота следования импульсов

$$F = 1/t_s = c/L$$

измеряется частотомером.

Недостатком приборов этого типа является нестабильность срабатывания порогового устройства при нарастании амплитуды импульса на входе приемника, а также зависимость крутизны преобразования изменений скорости звука в частоту от базы измерений. К достоинствам этих приборов относятся простота и надежность в эксплуатации. Они позволяют измерять акустический коэффициент преломления с погрешностью порядка  $10^{-4}$ . Поэтому данные приборы являются основой для построения акустических измерительных комплексов, предназначенных для исследования океана.

**Фазовый метод** разработан на основе измерения времени задержки сигнала по разности фаз излучаемого и принятого сигналов. Блок-схема измерителя подобного типа представлена на рис. 3.3.

В исследуемую среду излучается тональный сигнал с частотой  $f$ . Фаза принятого сигнала  $\varphi = 2\pi f t_s$ , а скорость звука

$$c = 2\pi f L/\varphi.$$

Фазовые методы могут быть реализованы с постоянной либо переменной частотой. К достоинствам этого метода следует отнести простоту регистрации сдвига фаз. Однако здесь же возникают определенные трудности из-за неоднозначности показаний, в случае если разность фаз больше  $2\pi$ , а также высокой чувствительности прибора к электрическим помехам. На основании этого метода, например, созданы приборы для измерения флуктуаций показателя акустического преломления с погрешностью порядка  $10^{-6}$  при базе 5 см и частоте ультразвука 2,0 МГц.

**Резонансный метод** основан на регистрации зависимости частоты колебаний резонирующего объема исследуемой жидкости от его формы и линейных размеров (базы) и скорости звука в жидкости, а значение последней определяют из обратного общего соотношения. Резонансные методы подразделяются на прямые, интерферометрические, основанные на явлении интерференции между излучаемыми и отраженными плоскими акустическими волнами, и автогенератор-



Рис. 3.3. Схема фазового измерителя скорости звука.

1 — генератор гармонических колебаний; 2 — акустический излучатель; 3 — акустический приемник; 4 — усилитель; 5 — фазометр.

ные, основанные на определении частоты колебаний автогенератора с акустическим резонатором. Скорость звука в этих методах определяется из зависимости  $c = \phi(f, L)$ . Приборы, сконструированные на основе этих методов, не отличаются высокой точностью и поэтому не находят широкого применения.

**Доплеровский метод** базируется на использовании известного эффекта изменения частоты акустического сигнала при взаимном смещении источника и приемника звука — эффекта Доплера, названного по имени австрийского физика К. Доплера, обосновавшего его в акустике и оптике в 1842 г. При перемещении приемника звука относительно излучателя (или наоборот) возникает сдвиг по частоте (изменение длины волны) между излучаемым и принятым сигналами, зависящий от скорости перемещения и скорости звука в воде.

**Неконтактные методы** основаны на взаимодействии излучений (оптических, акустических) с морской водой. Из известных методов можно назвать **акустический реверберационный**. Сущность этого метода заключается в следующем. Короткий акустический импульс с очень узкой диаграммой направленности распространяется от излучателя в сторону дна, рассеиваясь на неоднородностях водной среды (пузырьки воздуха, взвеси, температурные неоднородности и т. п.). Рассеянный (реверберационный) сигнал принимается высокочувствительным приемным устройством также с узкой диаграммой направленности.

Значение скорости звука в области пересечения характеристик направленности (на рис. 3.4 заштрихованная область) определяется три-

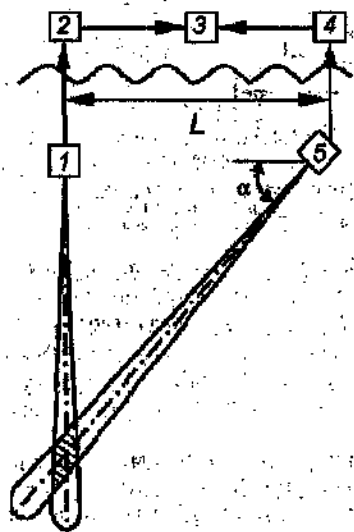


Рис. 3.4. Блок-схема реверберационного измерителя скорости звука.  
1 — излучатель; 2 — генератор; 3 — регистратор; 4 — усилитель; 5 — приемник.

ангуляционным способом по базе прибора  $L$ , углу наклона  $\alpha$  (характеристики направленности приемного устройства) и времени задержки  $t_z$  от момента выхода из источника до прихода к приемному устройству через область пересечения.

Лучшие образцы аппаратуры для измерения скорости звука импульсно-циклического типа в стационарном (лабораторном) варианте позволяют достигать точности 0,1 м/с, а точность судовых измерителей не превышает пока 0,3 м/с.

Точность измерителей скорости звука должна определяться задачами исследования. Так, например, при определении гидрофизических параметров (солёности, сжимаемости, характеристик течений и пр.) относительная погрешность измерения абсолютных значений скорости звука будет зависеть от заданной погрешности определения соответствующего параметра и вида функциональной зависимости, связывающей этот параметр со скоростью звука.

### 3.4. Косвенные методы определения скорости звука

При использовании акустических методов для исследования гидродинамических параметров водной среды решают задачу, обратную задаче теории связи, а именно: по изменению характеристик акустической волны, прошедшей заданный объем среды, находят значения того или иного параметра. Трудность решения этой задачи определяется неоднозначной связью исследуемого параметра среды с изменяемой характеристикой волны и интегральным влиянием изучаемого параметра среды на измеряемое значение характеристики волны. Для морской среды, например, скорость звука сложным образом зависит от таких параметров воды, как температура, соленость, давление.

Известные в настоящее время методы косвенных вычислений скорости звука в морской воде основаны на изменении на заданных горизонтах вышеперечисленных параметров и расчете скорости звука на этих горизонтах по формулам, выражающим зависимость ее от измеренных параметров:

$$c = \varphi(T, S, P).$$

Существует ряд эмпирических аналитических зависимостей, связывающих с определенной точностью в некоторых пределах скорость звука с названными параметрами. Все их можно разделить на две группы. Первая группа включает полуэмпирические формулы, полученные из известной теоретической зависимости Ньютона—Лапласа для скорости звука:

$$c = (k/\rho)^{0,5}, \quad (3.1)$$

где  $k$  — модуль объемной упругости;  $\rho$  — средняя плотность.

Для перехода от теоретической зависимости к полуэмпирической находят теоретические или эмпирические зависимости

$$k = \varphi_1(T, S, P); \quad \rho = \varphi_2(T, S, P),$$

которые подставляются в (3.1). После этого через разные и достаточно малые интервалы задаются значения гидрофизических параметров  $T$ ,  $S$ ,  $P$ , и из выражения

$$c = \left[ \frac{\varphi_1(T, S, P)}{\varphi_2(T, S, P)} \right]^{0,5}$$

вычисляются соответствующие значения скорости звука  $c$ . Используя полученные данные, известными методами (например, методом наименьших квадратов) подбирают эмпирическую зависимость скорости звука от гидрофизических параметров.

Ко второй группе относятся эмпирические зависимости данных прямых экспериментальных измерений скорости звука в морской воде при различных значениях  $T$ ,  $S$  и  $P$ . Здесь расчет эмпирических формул для определения скорости звука сводится к поиску зависимости вида

$$c = c_0 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_P + \Delta c_{T,S,P},$$

где  $c_0$  — опорная скорость звука, в качестве которой часто принимают ее значение при  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $S = 35\text{‰}$  и  $P = 0$ , обозначая ее  $c_{0,35,0}$ ;  $\Delta c_T$ ,  $\Delta c_S$ ,  $\Delta c_P$  — поправки на влияние температуры, солёности и гидростатического давления соответственно;  $\Delta c_{T,S,P}$  — корректировочный член, учитывающий совместное влияние указанных факторов, определяемый в процессе подбора эмпирической формулы.

Среди существующих эмпирических формул наиболее известны формулы Вуда, Вильсона, Дель Гроссо, Лероя. Получены эти зависимости с помощью различных инструментальных методов и поэтому имеют различные погрешности при одинаковых сочетаниях гидрофизических факторов. Так, несколько первых членов формулы Дель Гроссо имеют вид

$$c = 1449,0684 + 4,57462T - 5,27147 \cdot 10^{-2}T^2 + \\ + (S - 35)(1,84435 - 1,32888 \cdot 10^{-2}T + 1,0444 \cdot 10^{-4}T^2) + \dots,$$

где  $c$  — скорость звука, м/с;  $T$  — температура, К;  $S$  — солёность, ‰.

Эта формула позволяет определить скорость звука с точностью 0,013 м/с в диапазоне температур 273—303 К, солёности 31—39 ‰ и при атмосферном давлении. Формула Вильсона обеспечивает среднеквадратическую погрешность относительно своих экспериментальных данных до 0,22 м/с. Эти две формулы пользуются наибольшей популярностью. Однако из-за различной точности экспериментальных данных абсолютную точность методов сравнивать затруднительно. Результирующая погрешность косвенного определения включает погрешность эмпирической формулы, зависящей от погрешности измерения исходных данных ( $T$ ,  $S$ ,  $P$ ) и несоответствия расчета по формуле относительно исходных экспериментальных данных.

## Глава 4

### ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИН (ПРОМЕР)

#### 4.1. Подводный рельеф

Одним из важнейших объектов океанографических исследований является рельеф дна. Рельефом называют совокупность неровностей земной поверхности, различных по очертаниям, размерам, происхождению, возрасту и истории развития. Рельеф того или иного участка складывается из многократно чередующихся и повторяющихся по размерам и внешнему виду форм. Формами рельефа называют естественные тела, представляющие собой обособленные части земной поверхности, сравнимые, в известной степени, с геометрическими фигурами. Важная характеристика рельефа — размеры его форм, которые классифицируются следующим образом: планетарные формы, мегарельеф, макрорельеф, мезорельеф, микрорельеф и нанорельеф.

**Планетарные формы (геотекстуры)** — крупнейшие формы рельефа, определяющие облик нашей планеты. Они занимают огромные площади, исчисляемые сотнями тысяч и даже миллионами квадратных километров. Планетарный рельеф представляют океаны и материки.

**Мегарельеф** — крупнейшие формы рельефа, площадь которых составляет десятки или сотни тысяч квадратных километров. Примером могут служить котловины океанов, а на суше — горные системы.

**Макрорельеф** — крупные формы рельефа, занимающие площади в сотни, тысячи и, значительно реже, десятки тысяч квадратных километров. К ним относятся отдельные хребты, плато, абиссальные равнины.

**Мезорельеф** — средние формы рельефа, занимающие площадь в пределах от нескольких десятков квадратных километров. Обычно это небольшие хребты, скопления абиссальных холмов, участки грядового рельефа.

**Микрорельеф** — мелкие формы рельефа, осложняющие поверхность мезорельефа. К ним относятся береговые валы, эрозионные рвы и т.п.

**Нанорельеф** — самые малые формы рельефа, возникающие в пределах микро- и мезорельефа. Типичным представителем такого рельефа является рябь на морском дне.

Важнейшей задачей морских гидрофизических исследований (согласно стандарту СЭВ 3849-82, гидрография — наука, изучающая рельеф и грунт морского дна в интересах мореплавания и использования природных ресурсов) является подводный рельеф, под которым понимают совокупность всех форм поверхности морского дна. Мор-

ское дно — часть поверхности земной коры, находящейся в пределах моря ниже его уровня. Подводный рельеф по сложности не уступает суше, а отдельные его участки по степени горизонтальной и вертикальной расчлененности даже превосходят ее.

Подводный рельеф изучают прежде всего как источник навигационной опасности. Кроме того, эта информация может быть использована для выбора пунктов базирования, организации промысла, разведки и добычи полезных ископаемых, а также как первичный материал для фундаментальных наук о Земле. Большое значение имеют и сведения о рельефообразующих процессах и характере донных осадков.

Для изучения подводного рельефа необходимо измерить глубины на всей обследуемой акватории. Такая съемка подводного рельефа называется *промерными работами*, или просто *промером*. Его главные задачи: определение подводного рельефа и характера грунта дна; выявления и обследование характерных форм рельефа, навигационных опасностей, участков, удобных для подхода и высадки на берег; детальное обследование фарватеров, гаваней и мест якорных стоянок. Однако задача промера состоит еще и в достоверном выяснении взаимного расположения различных форм подводного рельефа и правильном определении абсолютного положения изученных районов на земной поверхности. Важной особенностью промера является то, что подводный рельеф отделен от наблюдателя непрозрачным слоем воды. Здесь не может использоваться способ целесообразного подбора точек измерения глубин.

Для более полной характеристики дна важно получить также и сведения о грунтах, необходимые для обеспечения мореплавания и других нужд. В последние годы интерес к изучению грунтов вырос в связи с расширением добычи полезных ископаемых в шельфовой зоне, что обосновывает организацию специальных работ по исследованию донных грунтов — *грунтовой съемки*.

Важнейшей составной частью всех этих работ являются наблюдения за колебаниями уровня моря для приведения измеренных глубин к единой уровенной поверхности.

## 4.2. История развития промера

Первые сведения об океане в основном поступали от путешественников и капитанов судов, которых в первую очередь интересовали возможности навигации и безопасность мореплавания. Так на протяжении веков накапливалась информация о приливах, течениях и глубинах главным образом в мелководных районах. Насколько проста история обычного промера, настолько сложна история промера глубоководного. Еще на заре мореплавания появился ручной лот — веревка с грузом на конце (в таком виде он существует и в настоящее время). Первые сведения о промере отмечают еще в «Естественной истории» Плиния Старшего (23 г. до н. э. — 79 г. н. э.): «Наибольшая глубина Черного моря, по словам Фабиана, достигает 15 стадий (2700 м), другие считают, что в 300 стадиях от

берега земли племени кораксов Черное море неизмеримо и там еще никто не достигал его дна». Следующее отмеченное в истории измерение глубин в открытом море провел Магеллан во время кругосветного плавания в Тихом океане у о-вов Св. Павла и Тиборона. Монах Георг Фурнье в книге «Гидрография» отмечает, что, даже связав все судовые снасти, Магеллан получил лотлинь длиной 400 морских саженей (около 730 м) и не достал дна. До конца средних веков повсеместно господствовало мнение, опиравшееся на авторитет Аристотеля, что океаны являются бездонными пропастями.

В 1773 г. английский капитан Фипс первым доказал возможность измерять достаточно большие глубины. Пытаясь как можно глубже опустить термометры в воду, он положил их на грунт. Вытравливая за борт лить с термометрами, он через какое-то время заметил, что лить стал обегать чуть медленнее. При подъеме термометров, начиная примерно с того же места, выбирать лить стало трудней. В этом месте на лить наложили марку и, выбрав, измерили длину лия от марки до груза (около 1250 м), который был покрыт илом.

В 1798 г. горный заседатель Никита Карелин и мастера Егор Крылов и Сергей Сметанин выполнили на Байкале два промерных галса общей протяженностью около 120 км с 28 промерами глубин, из которых 5 превышали 1000 м с максимальной глубиной 1238 м.

Во время плавания на шлюпе «Предприятие» под командованием О. Е. Коцебу в 1823—1826 гг. Э. Х. Ленц для проведения глубоководного промера использовал сконструированную его учителем, профессором Дерптского университета, Е. И. Парротом специальную лебедку с автоматическим тормозом, срабатывающим при достижении дна лотом. При этом Ленц учитывал угол наклона троса. Подобный способ был использован в 1868 г. капитаном Ф. Н. Кумани на корвете «Лявица» при выполнении глубоководного промера в Черном море для выяснения трассы кабеля.

В принципе только в 50-е годы XIX в. началась «кампания» измерения больших глубин, вызванная практическими задачами: прокладкой тихоокеанского телеграфного кабеля. Возглавлял эти работы Мэтью Фонтейн Мори, лейтенант флота США. Первые попытки оказались неудачными, пока вместо обычного лотлиня не стали использовать тонкий шнур, а вместо груза — пушечное ядро. Помощник Мори мичман Брук в 1853 г., воспользовавшись идеей Петра I, сконструировал лот, в котором для объективного свидетельства о достижении дна трубка лота была полая и наполнена салом, что позволяло захватывать образцы грунта дна. Для увеличения точности данного метода его использовали в комплексе со специальной вертутшкой, измеряющей пройденный путь и известной под названием вертутшки Бауэра—Мори.

В 1872 г. Томсон (один из учредителей Индо-Европейской телеграфной компании) получил патент на промерную лебедку с автоматическим тормозом и проволоочным лотлинем, прообразом которой явилась лебедка Паррота и Ленца. Лебедка Томсона успешно использовалась в экспедиции Шпиндлера в 1890—1891 гг. для промеров в Черном море.



Прокладка подводного кабеля в Атлантическом океане выявила насущную необходимость знаний о глубинах океана. Батиметрическая карта Северной Атлантики, созданная Мори в 1873 г., была основана примерно на 800 измерениях и на ней удалось показать черты рельефа дна: шельф, глубоководные котловины и срединный хребет. Более подробная батиметрическая карта всего Мирового океана, составленная в масштабе 1:10 000 000 только в 20-е годы XX в., основывалась лишь на 17 856 промерах, т. е. один промер на 20 000 км<sup>2</sup>.

Попытки использовать более рациональные способы измерения глубин, например с применением эха, предпринятые Боникестлем, Колодоновым, Мори и другими, не увенчались успехом. Первые эхолоты появились лишь в 1918—1920 гг. в Германии (эхолот Вема), во Франции (эхолот с самописцем конструкции Марти) и в Америке (эхолот Фессендена). В 20-х годах были созданы первые ультразвуковые эхолоты (Ланжевен, Шиловский, Флориссон). И в настоящее время эхолоты различных систем являются основным средством проведения промерных работ.

### 4.3. Цели и состав гидрографических исследований

Гидрографические исследования проводятся в отдельных районах гидросферы и включают в себя научное проектирование, выполнение гидрографических работ, обработку и анализ их результатов. Одним из основных способов хранения и представления результатов гидрографических исследований является морская карта — важнейший источник гидрографической информации о Мировом океане.

Гидрографические работы, выполняемые для получения сведений о подводном рельефе с целью последующего его изображения на картах, называют съемкой рельефа дна. По материалам съемки составляют или корректируют морские карты.

Задача съемки заключается не только в достоверном определении взаимного расположения различных объектов в море, но и в указании точного положения изученных районов на поверхности Земли, что осуществляется их плановой привязкой к единой системе координат земного эллипсоида.

Измеренные при выполнении съемки глубины являются вертикальными расстояниями от поверхности воды до дна. Но в море положение поверхности воды непрерывно меняется. Поэтому при составлении карт эту поверхность нельзя принимать за отсчетный уровень, а отсутствие в море нивелирных сетей не позволяет осуществлять передачу высот традиционными геодезическими методами. Все это требует разработки специфической методики высотного обоснования гидрографических работ.

Поскольку морская вода плохо пропускает электромагнитные волны в довольно широком диапазоне, необходимо было создать принципы, конструкции и методы использования измерительной аппаратуры, которые существенно отличались бы от таковых для наземных топографических работ. Так, например, аэрофотосъемка в море исполь-

зуются только на малых глубинах, но и здесь сказывается различие оптических свойств двух сред — воды и воздуха. Наиболее пригодными для измерений в морской воде являются акустические волны, поэтому современные гидрографические исследования в основном опираются на гидроакустическую аппаратуру: эхолоты, эхографы, эхотралы, гидролокаторы, гидроакустические навигационные системы.

В организационном плане гидрографические исследования осуществляются в три этапа: подготовка к исследованиям, выполнение работ в море и обработка полученных результатов.

Подготовительный этап включает: научное планирование, состоящее в определении района и задач гидрографических исследований, а также в изучении предшествующих материалов; выбор видов работ, методов и средств проведения исследований; подготовку плавсредств, аппаратуры, личного состава; выполнение предварительных расчетов и построение рабочих планшето́в.

В состав собственно гидрографических работ в общем случае входят: геодезическая подготовка района работ (плановое обоснование); определение нуля глубин (высотное обоснование) и приведение измеренных глубин к нулю глубин; съемка рельефа дна; гидрографическое траление; морская грунтовая съемка; топографическая съемка прибрежной полосы; сбор сведений для лоций.

Плановое обоснование производится с целью надежного и точного определения положения обследованных акваторий на земной поверхности. В качестве нуля глубин на картах, издаваемых гидрографической службой нашей страны в настоящее время, принимают: на неприливных морях — средний многолетний уровень; на приливных морях — наинизший теоретический уровень, рассчитанный исходя из действия приливообразующих сил Луны и Солнца. К приливному морям здесь относятся также, на которых средняя величина прилива равна или более 50 см.

В районах с относительно малыми глубинами (0—50 м) и сложным рельефом дна, если в этих районах осуществляется интенсивное судоходство, применяются следующие способы съемки для обеспечения наиболее полной гарантии навигационной безопасности плавания:

— от уреза воды до глубин естественной прозрачности воды выполняется площадное обследование аэрофотосъемкой. Полученные при этом материалы позволяют определить глубины и выявить участки со сложным характером рельефа, которые дополнительно обследуются эхотралами; при необходимости производится также гидрографическое траление, а на отдельных небольших участках — водлазное обследование. Гидрографическое траление заключается в сплошном, без разрывов, обследовании отдельных акваторий с помощью специальных устройств (гидрографических тралов), позволяющих выявлять все навигационные опасности, глубина над которыми меньше допустимой;

— на глубинах от естественной прозрачности до 30 м в районах, имеющих важное навигационное значение, проводится площадное обследование эхотралами, в необходимых случаях выполняется гидрографическое траление, а на отдельных небольших участках — вс-

долазное обследование. В остальных районах выполняется промер с инструментальной оценкой рельефа дна. На выявленных участках с признаками навигационных опасностей проводятся промеры со спущением галсов; площадные обследования эхолотами, а при необходимости водолазами;

— на глубинах 30—50 м в районах, имеющих важное навигационное значение и сложный рельеф, выполняется промер с инструментальной оценкой рельефа дна;

— на глубинах более 50 м выполняется промер. На участках с признаками навигационной опасности спускают галсы промера, который в диапазоне глубин 50—200 м проводят в сочетании с инструментальной оценкой рельефа дна.

Площадное обследование аэрофотосъемкой производится совместно с разряженным промером, а спущение промера производят после обработки материалов аэрофотосъемки (определение глубин) фототриграмметрическим или стереотриграмметрическим способами. В районах, где требуется выполнение промера с инструментальной оценкой рельефа дна, они производятся одновременно с одного судна.

При площадном обследовании аэрофотосъемкой маршруты прокладываются вдоль общего направления берега, а продольное перекрытие снимков должно составлять не менее 60 %. Разряженный промер выполняется с условием, чтобы на каждый снимок приходилось не менее трех галсов промера.

При площадном обследовании эхолотами ГЭТ-2 съемка производится одним покрытием, при инструментальной оценке эхографом бокового обзора — одним двусторонним покрытием, эхолотом типа ГЭТ-1 — двумя системами пересекающихся галсов. Перекрытие двух смежных полос обзора должно быть не менее двух средних квадратических погрешностей определения места.

При промере с инструментальной оценкой рельефа дна междугалсовые расстояния рассчитываются исходя из ширины полосы обзора средств инструментальной оценки и величины перекрытия смежных полос обзора. При промере междугалсовые расстояния основного покрытия выбираются в зависимости от характера рельефа дна и глубин с учащением галсов при уменьшении глубин и изрезанности рельефа (диапазон расстояний может быть от 0,05 до 20 км).

Измерение глубин при съемке с использованием эхолотов или эхолотов ведется непрерывно с записью их на аналоговом самописце или магнитном носителе. При использовании наметок и ручных лотов глубины измеряют через промежутки не более четверти междугалсового расстояния, при резком изменении глубин и больших уклонах дна расстояние уменьшают в два раза. У причальных сооружений глубины измеряют на расстоянии 1, 3, 5, 7, 10 м от стенки и далее через 5 м, а на откосах и бровках каналов — не реже чем через 5 м.

Съемка рельефа дна и гидрографическое траление дают информацию только о глубинах и характере изрезанности рельефа и не позволяют судить о генетических признаках рельефа, данные о которых можно получить лишь путем изучения донных грунтов (морс-

кая грунтовая съемка). Сведения о донных грунтах имеют не только научные, но и прикладные цели: выбор места якорных стоянок и районов покладки на грунт глубоководных аппаратов, строительство гидротехнических сооружений, прокладка нефте-, газопроводов и подводных кабелей. Кроме того, изучение донных грунтов необходимо в связи с ростом поиска и добычи полезных ископаемых.

На третьем, последнем, этапе производятся: обработка всей полученной в море информации с целью достижения наибольшей точности и достоверности выполненных измерений; составления отчетных планшетов и описаний; научный анализ полученных результатов; составление научно-технического отчета с оценкой полученных материалов.

#### 4.4. Средства для съемки рельефа дна

Основные требования к современным средствам для съемки рельефа дна можно сформулировать следующим образом: получение надежных данных в пределах всего диапазона глубин Мирового океана (0—12 000 м), обеспечивающих нужды картографирования и решение научных и производственных задач; проведение измерений, регистрации и архивирования получаемой информации в автоматическом режиме с возможностью ее представления в реальном масштабе времени; возможность непрерывной работы в течение длительного времени; ограниченные габариты, масса и потребление энергии; невысокая стоимость аппаратуры и ее эксплуатация. По своему принципу действия все существующие в настоящее время средства для съемки рельефа дна можно подразделить на механические, гидроакустические и оптические.

*Механические средства* измеряют глубины непосредственно в линейной мере. Они являются первыми приборами для измерения глубин. Из многочисленных приборов этой группы до наших дней дошли наметка; ручной и механический лоты со стальным лотлинем.

*Наметка* представляет собой еловый, бамбуковый или алюминиевый шест диаметром 5 см и длиной до 6 м. Разбивку наметки производят в дециметрах, точность отсчета глубины составляет до 0,1 м. При измерении глубин на участках с мягким грунтом на нижний конец наметки (пятку) надевают башмак — диск диаметром 10—12 см. Наметкой измеряют глубины до 5 м со шлюпок или катеров, когда использование эхолотов или эхотралов невозможно, например, из-за густых водорослей.

*Ручной и механический лоты* со стальным лотлинем диаметром 2—3 мм и свинцовым грузом массой не менее 4 кг измеряют глубины вдоль причальных стенок, на отмелях, в узкостях, небольших портах и гаванях, где возможно перемещаться только с помощью шлюпок, а также при промере со льда и в процессе тарировки эхолотов. При промере лотами отсчет глубины производится по ближайшей погруженной в воду марке, наложенной на лотлинь, при вертикальном положении лота в момент касания им дна.

**Гидроакустические средства** основаны на закономерностях распространения акустического импульса в морской воде и его отражения от поверхностей раздела двух сред. В настоящее время они являются основным инструментом при съемке подводного рельефа. Среди гидроакустических средств различают эхолоты, многолучевые гидроакустические устройства и эхографы бокового обзора.

**Эхолот** — судовой навигационный прибор для измерения глубин, представляющий собой однолучевое гидроакустическое устройство для измерения вертикальных расстояний от излучателя до дна по скорости  $V$  распространения звука в воде. Глубину места  $H$  можно определить как отношение

$$H = 0,5Vt,$$

где  $t$  — время прохождения электрическим импульсом расстояния от излучателя до дна и обратно.

Для точного измерения небольших промежутков времени используют механическую или электронную развертки. При механической развертке моменты излучения акустических импульсов реагируют на эхограмме в виде прямой линии, служащей началом отсчета, а моменты приема отраженных сигналов в виде профиля дна. При электронной развертке время регистрируется с помощью высокостабильных генераторов кодовых импульсов на цифровых указателях глубин (ЦУГ), на технических носителях данных или подается непосредственно на ЭВМ для последующей обработки.

Эхолоты классифицируют по тактико-техническим параметрам, таким, как диапазон измеряемых глубин, направленность излучения, разрешающая способность, частота посылки импульсов, инструментальная точность. Все эти параметры зависимы и их подбирают так, чтобы с помощью данного типа эхолота наилучшим образом решить узкую задачу.

По диапазону измеряемых глубин эхолоты делятся на мелководные (промерные), предназначенные для измерения глубин до 300—500 м (ПЭЛ-3, ПЭЛ-4); среднеглубинные (навигационные) — для глубин до 2000 м (НЭЛ-10); глубоководные — для глубин до 12 000 м (ПЭЛ-3). Для промера на реках и озерах используют или промерные (ПЭЛ-4, ПЭЛ-5), или специальные речные эхолоты (ИРЭЛ).

Улучшение свойств эхолотов, в том числе увеличение точности измерений и разрешающей способности, достигается, в частности, путем направленного излучения акустического импульса. Степень направленности характеризуется углом раствора диаграммы, в пределах которого интенсивность колебаний изменяется от максимума до нуля. Различают эхолоты с широкой, нормальной диаграммой и узколучевые (прецизионные) эхолоты. Направленность обычных эхолотов ограничивают углом  $\theta \approx 10^\circ$ , что позволяет измерять глубины в условиях небольшой качки. У прецизионных эхолотов угол излучения составляет 1—2° и менее, что требует использования гиросtabilизирующих устройств для удержания оси диаграммы вдоль отвесной линии.

Разрешающая способность эхолотов — минимальное расстояние между объектами, регистрируемыми раздельно, — определяется из соотношения

$$l = 0,5V\tau,$$

где  $l$  — разрешающая способность эхолотов;  $\tau$  — длительность импульса. У современных эхолотов  $\tau$  колеблется в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  с.

Частота посылок импульсов  $f_n$ , определяющая детальность съемки рельефа дна, ограничивается максимальной глубиной  $H_{\max}$  и определяется из соотношений

$$H_{\max} = 0,5Vt_{\max}; t_{\max} = 2H_{\max}/V; f_n < 1/t_{\max}.$$

Отсюда расстояние между смежными точками измерения глубины окажется равным

$$S = V_c/f_n = V_c t_{\max},$$

где  $V_c$  — скорость судна при съемке рельефа дна, м/с.

Инструментальные погрешности современных эхолотов, обусловленные несовершенством конструкции и неизбежной нестабильностью отдельных ее элементов, составляют незначительную часть суммарной погрешности измерения глубин, состоящей, кроме того, из внешних и методических погрешностей. Выявление, учет и оценка двух последних погрешностей — важнейшая задача гидрографии в процессе съемки. Среднее квадратическое значение инструментальной погрешности определяется с помощью специальных исследований и заносится в паспорт каждого прибора.

К недостаткам эхолотов, при всей их точности и детальности съемки вдоль промерных галсов, относится наличие пространства между галсами, которое остается необследованным.

*Многолучевые гидроакустические устройства* объединяют приборы, создающие в толще морской воды направленное акустическое излучение, имеющее значительную протяженность по нормали к диаметральной плоскости судна. Акустическое поле здесь создается некоторым числом узко направленных излучателей (от 8 до 100 в зависимости от конкретных целей и районов океана), каждый из которых работает на принципе отдельного эхолота, либо формируется с помощью специальных антенных систем.

Многолучевые гидроакустические устройства по своим особенностям геометрии поля подразделяются на приборы, формирующие акустическое поле вертикальными лучами с помощью некоторого числа приемонизлучателей, размещенных на забортовых носителях, и приборы, формирующие акустическое поле наклонными лучами с помощью вибраторов или специальных гидроакустических антенн, установленных непосредственно на судах.

По структуре акустического поля различают приборы, образующие сплошной сектор за счет перекрывающихся или соприкасающихся диаграмм направленности, и приборы со смежными диаграммами направленности, находящимися на некотором удалении друг от друга.

У нас в стране используются эхотралы и многолучевые эхолоты. Первыми приборами для площадного обследования подводного рельефа были гидроакустические устройства, названные по аналогии с механическими тралами эхотралами. Среди эхотралов встречаются оба типа многолучевых устройств.

Эхотралы первого типа объединяют большое число эхотралов с вынесенными за пределы судна вибраторами, установленными на жестких конструкциях в 1—2 м один от другого по траверсам левого и правого бортов. Отечественным представителем данного типа приборов является эхотрал ГЭТ-2, основными недостатками которого являются низкая маневренность, малая скорость при обследовании акваторий и ограничения из-за погоды.

Вибраторы в эхотралах второго типа крепятся на подводной части судна, что обеспечивает жесткую ориентацию осевой линии характеристики направленности каждого канала под заданным углом  $\gamma$  относительно вертикали. Специальный подбор углов  $\gamma$  и углов  $\theta$  диаграммы направленности позволяет, начиная с некоторой небольшой глубины, образовывать взаимное перекрытие акустических лучей смежных каналов для получения глубины погружения всех подводных объектов в процессе траления. В этом случае собственно глубины измеряются только центральными вертикальными каналами, а остальные измеряют наклонные расстояния

$$L = 0,5Vt,$$

которые можно перевести в глубины с помощью выражения

$$H = L \cos \gamma_0,$$

где  $\gamma_0$  — угол падения кратчайшего луча в заданном канале.

Отечественный представитель данного типа приборов — гидрографический эхотрал ГЭТ-1.

Главное назначение эхотралов заключается в обнаружении подводных опасностей и обзоре междугалсовых промежутков для определения участков, где необходимо увеличение подробности съемки.

Эхотралы по сравнению с эхолотами позволяют увеличить ширину обследования на одном галсе. В эхотралах первого типа она определяется числом вибраторов и расстоянием между ними, а в эхотралах второго типа она зависит от общей ширины диаграммы направленности в вертикальной плоскости и меняется пропорционально глубине в районе исследований. Так, у эхотралов ГЭТ-1 при работе всех каналов ширина полосы обследований составляет  $2,4H$ . Но ГЭТ-1 имеют существенную суммарную погрешность измерения глубин за счет дополнительного искажения измерений рефракцией, которая увеличивается от центрального канала к крайним. В условиях качки погрешность увеличивается, что требует ограничения допустимых условий работ или создания стабилизации ориентирования каналов и учета углов качки.

Многолучевые эхолоты формируют и сохраняют заданное направление вертикального и большого числа узких наклонных лучей, расположенных по нормали к диаметральной плоскости судна, с помо-

цию специальных гидроакустических антенн. Разрешающая способность устройства в полосе сканирования определяется шириной луча, а число регистрируемых здесь глубин при одном зондировании — общим числом лучей. Устройство может работать только при отсутствии дифферента, что позволяет устранить воздействие килевой качки, а бортовая качка учитывается при вычислении глубин по измеренному углу качки  $\Delta\gamma$ .

*Эхографы бокового обзора* — это гидролокационные системы с листообразной характеристикой направленности. В вертикальной плоскости ее раствор составляет несколько десятков градусов, а в горизонтальной менее  $2^\circ$ . Плоскость основного донного рельефа нормальна к диаметральной плоскости судна. Ультразвуковые импульсы периодически излучаются приемопередающими антеннами эхографов и при своем распространении в пределах диаграммы направленности последовательно облучают узкую полосу дна. При этом от каждого участка дна к антенне последовательно возвращаются эхосигналы. За время между смежными посылками импульсов судно смещается в новую точку, что позволяет очередному импульсу облучать новую полосу дна. Время от момента излучения до приема эхосигнала измеряется с помощью механической развертки. Эхосигналы регистрируются на движущейся ленте, прожигая бумагу. Яркость отметок эхограммы пропорциональна амплитуде отраженного сигнала, а их удаление от нулевой линии пропорционально наклонному расстоянию от приемника до соответствующей точки морского дна.

Каждый новый импульс регистрируется в новой строке эхограммы. Совокупность строк с отметками различной яркости создает теневое изображение рельефа дна и обеспечивает принципиальную возможность дешифрирования рельефа, которая, правда, остается одной из наиболее сложных задач при использовании эхографов. Кроме того, эхографы не позволяют получать количественную оценку глубин. В настоящее время эхографы бокового обзора используются для обследования подводного рельефа в промежутках между съемочными галсами с целью выявления сложных участков, требующих увеличенной подробности. К отечественным устройствам бокового обзора относятся гидрографический эхограф ГЭБО-100 и гидрографические комплексы ГКБО-500 и ГКБО-2000.

*Оптические средства для съемки подводного рельефа* основаны на закономерностях распространения света и свойствах оптического поля. В этом случае используются фотографирование и светолокация. Основными факторами, определяющими характеристику и возможности оптических средств съемки рельефа дна, являются: оптические свойства морской воды; мощность и энергетический спектр оптических излучателей; размеры и отражающие свойства форм подводного рельефа; контрастная чувствительность оптических приемников.

Фотографирование подводного рельефа в основном производится средствами *аэрофотосъемки* (АФС) со специальных серийных самолетов и вертолетов с использованием современных аэрофотоаппаратов (АФА). Результаты АФС подводного рельефа и побережья



представляются в виде контактных отпечатков с аэрофотофильмов. Для подробного изучения микрорельефа дна используются подводные *стереофотоаппараты*, заключенные в водонепроницаемые боксы. В качестве источника света здесь применяются мощные импульсные устройства, работающие синхронно с фотокамерами. Стереоснимки позволяют получить объемную модель морского дна.

К достоинствам методов фотографирования следует отнести возможность получения большого количества информации за короткое время. Недостатки в основном объясняются малой прозрачностью воды (малыми глубинами), разными спектральными характеристиками грунтов и отражением света от водной поверхности. Кроме того, изображение рельефа может быть получено только в фотолаборатории после обработки пленки, а картографирование сопряжено со сложным процессом обработки.

В последнее время для обследования дна стали использоваться новые методы: *ультразвуковая локация* рельефа и *акустическая голография*. Ультразвуковая локация заключается в облучении ультразвуковыми волнами с последующим преобразованием отраженных сигналов в электрические и синхронным формированием визуального изображения на телевизионном экране. При акустической голографии дно облучается звуковой волной, а отраженный сигнал накладывается на когерентную опорную волну, создавая дифракционную картину объекта. Эта картина регистрируется и после облучения когерентным источником света, чаще всего лазером, создает видимое объемное изображение подводного рельефа. Приборы, основанные на подобных методиках, отличаются аппаратурой большей сложности. Они позволяют получить крупномасштабное изображение небольших участков дна и производить съемку на расстояниях до 40—50 м с большой разрешающей способностью.

Лазерные средства для съемки подводного рельефа (светолокация) дают возможность измерять глубины через поверхность раздела воздух—вода при больших скоростях носителей аппаратуры. При этом используется измерение интервала времени  $t$  между моментами начала отражения световой энергии водной поверхностью и дном в каждом отдельном случае. Благодаря практически постоянной скорости распространения света в воде устраняются погрешности, обусловленные флуктуациями термохалинных условий; малое рассеивание лазерного луча исключает погрешности за счет наклона дна, а малая длительность импульсов обеспечивает высокую разрешающую способность.

## Глава 5

### НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОЛЕБАНИЯМИ УРОВНЯ МОРЯ

#### 5.1. Колебания уровня моря

Колебания уровня моря уже в глубокой древности обращали на себя внимание прибрежных жителей и мореплавателей. В местах с большими, в том числе и с приливо-отливными, колебаниями уровня, в устьях судоходных рек, в заливах и бухтах, служивших естественными убежищами для мореплавателей, постепенно начинались наблюдения за уровнем. Сначала их вели, вероятно, без всяких приборов — по обнажающимся и вновь покрывающимся водою скалам, камням и т. п., а затем, и уже довольно давно, появились простейшие устройства — *уровенные рейки* (измерительное устройство в виде рейки с делениями, предназначенное для непосредственного отсчета уровня моря).

Кроме задач мореплавания наблюдения за уровнем особенно важны при прибрежном гидротехническом строительстве и добыче полезных ископаемых на шельфе. Наблюдения в открытом море необходимы при гидрографических исследованиях — для привязки данных промера глубин к определенной *уровенной* поверхности. В научном отношении измерения уровня важны для понимания физических процессов, происходящих в Мировом океане: приливо-отливных, динамики водных масс, их трансформации и т. п.

Под *уровенной поверхностью* понимается поверхность морей и океанов, нормальная к направлению силы тяжести. *Уровнем моря* принято называть высоту поверхности моря, свободную от влияния ветровых волн и зыби, измеряемую относительно условного горизонта. В качестве условного горизонта можно использовать или так называемый *нуль поста* (условная, постоянная для данного уровня поста поверхность, от которой отсчитываются уровни моря), или *единый нуль постов моря* (единая условная поверхность, от которой производится отсчет уровня моря на всех *уровенных постах* данного моря или ряда морей). За единый нуль постов у нас в стране на морях, имеющих связь с океанами, принят горизонт, лежащий на 5,00 м ниже нуля Кронштадтского футштока, расположенного в месте, где впервые в России стали производиться систематические наблюдения за уровнем. За *нуль Кронштадтского футштока* принята горизонтальная черта на металлической пластине, укрепленной на устое моста в Кронштадте, расположенной на высоте, соответствующей среднему уровню за период 1825—1840 гг. Нуль Кронштадтского футштока фиксирует положение нулевой поверхности системы абсолютных отметок высот (Балтийская система высот (БС)).

Таким образом, основные требования к измерениям уровня моря, а в данный момент определяется мгновенный уровень моря, состоят в исключении короткопериодных колебаний, вызываемых ветровыми волнами и волнами зыби, и в постоянстве условного горизонта (принятого нуля отсчета). Гидрометеорологические и физико-географические условия района проведения наблюдений определяют требования к точности, дискретности и методике производства наблюдений, т. е. возможность использовать тот или иной вид приборов.

При исследовании колебаний уровня моря прежде всего необходимо учитывать величину и характер колебаний. Под *величиной колебаний уровня* понимают разность между наибольшим и наименьшим значениями уровня моря за определенный интервал времени, которые являются результатом наложения волновых колебаний различного происхождения.

Наиболее существенные изменения уровня наблюдаются на морях с наличием *приливо-отливных явлений* (динамические и физико-химические процессы в водах морей и океанов, вызванные приливообразующими силами), когда периодические повышения и понижения уровня могут составлять от 10 до 130 см/ч. Значительное влияние на колебания уровня оказывают и *сгонно-нагонные явления* — изменение уровня морей и океанов под воздействием ветра и атмосферного давления. При этом изменение уровня может достигать 30—40 см/ч. Кроме того, можно отметить *эвстатические колебания уровня моря* — изменения уровня Мирового океана, связанные с изменениями объема воды в нем, а также с изменениями емкости морей и океанов; *плотностные колебания уровня* — изменения уровня моря, обусловленные изменениями плотности воды; *бризовые колебания уровня моря* — сгонно-нагонные колебания уровня моря, вызванные воздействием бризовых ветров; *сейшевые колебания уровня моря* — свободные колебания уровня моря в виде стоячих волн в замкнутых и полужамкнутых водоемах, происходящие по инерции после воздействия внешних сил.

Измерения колебаний уровня моря должны выполняться с необходимой для решения определенной задачи точностью, достаточной, например, для обеспечения нужд мореплавания (судовождение, расположение и эксплуатация причалов и якорных стоянок), гидрографии (картография, лоции, средства навигационного оборудования), океанографии (режимные обобщения, специальные исследования, расчеты и прогнозы), геофизики, гидротехнического проектирования и строительства, добычи полезных ископаемых в море и т. п.

Постоянную информацию об уровне необходимо получать не менее четырех раз в сутки, т. е. раз в шесть часов. При сгонно-нагонных колебаниях наблюдения должны производиться каждый час, а при опасных для района повышениях или понижениях уровня и чаще. На практике часто приходится пользоваться и средним уровнем моря — величиной, полученной в результате осреднения наблюдаемых значений уровня за определенный интервал времени.

## 5.2. Методы измерения колебаний уровня моря

Колебания уровня моря отличаются амплитудно-частотными характеристиками и требуют специально организованных систематических измерений. Практически во всех приморских странах организована, как правило, сеть постоянных береговых и островных *уровенных постов* (место, оборудованное для наблюдений за уровнем моря).

Все эти измерения производятся различными типами приборов, включая и простую уровенную рейку. При этом необходимо отметить, что проведение систематических измерений уровня связано со значительными затруднениями, вызываемыми физико-географическими, гидрофизическими и гидродинамическими условиями прибрежной зоны. Это большая осушка и открытый берег, большие скорости течений, перенос твердых частиц, ледовые явления, разрушения берегов, обрастание измерительных приборов и т. п. В связи с этим для установки измерительных приборов необходимо строить капитальные дорогостоящие сооружения, а иногда приходится ограничиваться созданием временных, сезонных уровенных постов, но и это не всегда оказывается возможным.

Прибрежные наблюдения за колебаниями уровня моря ведутся на специально оборудованных уровенных постах. По устройству различают речные, свайные, свайно-речные посты, а также уровенные посты с установкой различного типа самописцев уровня моря — *ма-реографов* (приборы для измерения и непрерывной регистрации колебаний уровня моря). Для решения же отдельных задач кроме наблюдений на стационарной сети ведутся и эпизодические наблюдения на дополнительных и временных уровенных постах.

Речные уровенные посты, как правило, оборудуются в портах, у приглубого берега и снабжаются постоянными уровенными рейками. Свайные уровенные посты оборудуются при пологом дне моря и отсутствии гидротехнических сооружений и состоят из ряда свай, устанавливаемых в створе с проинвентаризованным профилем, с расстояниями между ними не более 50 м. Причем головка самой нижней сваи должна быть на 25—50 см ниже минимально возможного уровня, а головка самой верхней сваи — на 25—50 см выше максимально возможного уровня. Наблюдения выполняются переносными уровенными рейками. Свайно-речные уровенные посты оборудуются при пологом дне и значительных колебаниях уровня, когда дополнительно к сваям устанавливают постоянные уровенные рейки, а при необходимости можно использовать и переносные уровенные рейки.

Выбор типа уровенного поста и его конкретное выполнение целиком зависят от местных условий с учетом целей и задач проводимых наблюдений. И зачастую приходится идти на устройство капитальных установок несмотря на их большую стоимость, что, правда, полностью оправдывается при организации многолетних наблюдений. Иногда подобные установки включают непосредственно в план строительства портовых сооружений (молы, волноломы и т. п.) и возводятся вместе с ними. При экспедиционных работах используются, естественно, самые простые установки. При налаженной рабо-

те (своевременное нивелирование в первую очередь) риск устройства подобных постов, так как велика возможность потери приборов в штормовую погоду, оправдывается громадным выигрышем во времени и степени информативности.

Основное требование ко всем прибрежным наблюдениям за уровнем моря — это надежная связь их с самим берегом. Высотное положение нуля каждого уровенного поста должно быть точно определено относительно ближайшей высотной марки (репера) государственной нивелировки (триангуляционной сети). В случае отсутствия вблизи расположения уровенного поста марки государственной нивелирной сети здесь закладываются специальные (основные) реперы с расчетом обеспечения их сохранности на срок не менее 20—25 лет. Закладка основного репера уровенного поста осуществляется от марки государственной опорной сети двойным ходом IV класса при длине хода до 3 км и III класса при длине хода от 3 до 10 км. Кроме того, для повседневного контроля высотного положения постовых устройств и нуля поста закладывается и рабочий репер. В противном случае наблюдения на уровенном посту, не связанные с репером, позволяют получить лишь относительные данные о колебаниях уровня моря, имеющие сравнительно небольшое значение.

По принципу измерения уровня можно условно выделить два типа приборов: приборы, непосредственно измеряющие колебания уровня моря, например с помощью уровенных реек, поплавковых систем и т. п.; приборы, с помощью которых колебания уровня моря измеряются косвенным путем, например путем измерения гидростатического давления, затухания радиоактивного излучения и т. д.

Наиболее простым прибором для измерения колебаний уровня моря, с помощью которого ведутся систематические наблюдения на уровенных постах без автоматических регистраторов и контрольные наблюдения на постах с автоматическими регистраторами, являются *уровенные рейки*. Они бывают постоянными (футштоки), которые крепятся вертикально к неподвижным основаниям или скале, и переносными, устанавливаемыми в момент измерений на головку сваи.

*Поплавковые измерители колебаний уровня моря* довольно просты по своему устройству и надежны в эксплуатации. Чувствительным элементом в данных приборах является поплавок. Их инструментальные ошибки составляют 1—3 см. Работа прибора основана на принципе механической передачи изменений положения поплавка относительно нуля отсчета, вызываемых колебаниями уровня, на регистрирующее устройство, т. е. изменения уровня моря передаются поплавку, соединенному с противовесом с помощью троса или цепи, перекинутых через поплавочное колесо.

Условие равновесия всей этой системы в статическом режиме будет (по Г. Н. Мору)

$$F_2 = F_1 - F_3, \quad (5.1)$$

где  $F_1$  — сила тяжести поплавка;  $F_2$  — сила тяжести груза противовеса;  $F_3$  — подъемная сила поплавка при его погружении на глубину  $H$ .

Подъемная сила поплавка постоянного сечения при чистой открытой поверхности

$$F_3 = \alpha SH, \quad (5.2)$$

где  $\alpha$  — удельный вес поверхностного слоя воды;  $S$  — площадь сечения поплавка. Учитывая, что  $S = \pi d^2/4$ , получим

$$F_3 = \alpha H \pi d^2/4,$$

где  $d$  — диаметр рабочей части поплавка. При колебаниях уровня моря поплавок следит за ними только при наличии равновесия системы. Так, при падении уровня

$$F_2 < (F_1 - F_3) + \Delta F_3, \quad (5.3)$$

а при повышении

$$F_2 > (F_1 - F_3) - \Delta F_3, \quad (5.4)$$

где  $\Delta F_3$  — приращение подъемной силы поплавка. Здесь важным фактором является соблюдение неравенств при крайних значениях диапазона измерений

$$\Delta F_3 = \alpha \Delta H \pi d^2/4, \quad (5.5)$$

где  $\Delta H = \Delta H' + \Delta H''$  — суммарное приращение глубины погружения поплавка;  $\Delta H'$  и  $\Delta H''$  — приращение глубин погружения поплавка при падении и повышении уровня соответственно. Другими словами, движение поплавка начнется при высоте уровня выше или ниже начального на  $\Delta H$ .

Согласно (5.3)–(5.4), сила тяжести поплавка в пределах  $F_2 = (F_1 - F_3) \pm \Delta F_3$  меняется из-за приращения его глубины погружения, что автоматически регулируется подъемной силой поплавка. Очевидно, что изменение глубины погружения поплавка является источником погрешности в измерении колебаний уровня. Приращение глубины погружения поплавка не является постоянной величиной, а зависит от многих факторов. Из (5.5) видно, что для уменьшения  $\Delta H$  необходимо уменьшать  $\Delta F_3$  или увеличить  $d$ , что наиболее эффективно. В общем виде

$$\Delta H = f(F_1, F_2, \Delta F_2, F_{тр}, \Delta l), \quad (5.6)$$

где  $F_1, F_2$  — сила тяжести левой и правой части троса соответственно;  $\Delta F_2$  — подъемная сила части троса и груза противовеса в воде;  $F_{тр}$  — сила трения в узлах системы;  $\Delta l$  — линейное термическое расширение части троса с подвешенным поплавком. Следовательно, факторы, оказывающие влияние на погрешностные характеристики поплавок-овых измерителей:  $F_1, F_2, \Delta F_2$  и в какой-то мере  $F_{тр}$ , — связаны с колебаниями уровня моря, а  $d$  и  $\Delta l$  — с колебаниями температуры воды и воздуха.

Опыт эксплуатации и результаты расчетов поплавок-овых измерителей позволяют сделать вывод, что оптимальная высота рабочей части поплавка  $h$  должна быть более или равна  $\Delta H_{\max}$ , а точность из-

мерений в основном зависит от внешнего диаметра поплавка, т. е. от приращения его подъемной силы  $F_3$ , а также от амплитуды колебаний уровня и может быть доведена до  $\pm 1$  см. Сила тяжести груза противовеса должна быть равна максимальному приращению подъемной силы поплавка, т. е.  $F_2 = \Delta F_{3\max}$  при соблюдении условия равновесия и равенств системы. Поплавковому измерителю свойственна асимметрическая погрешность, которая зависит от подбора (расчета) элементов прибора.

*Электроконтактный метод измерения колебаний уровня моря* позволяет преобразовать положения уровня воды в электрические импульсы. Чувствительный элемент прибора, использующего этот метод, представляет собой ряд электрических контактов, расположенных на жестком основании через равные промежутки выше и ниже уровня воды. Системой постоянных резисторов электрические контакты соединены со схемой питания прибора и регистратором. При подъеме уровня контакты поочередно замыкаются на «землю», в результате чего электрическое сопротивление в цепи датчика уменьшается скачкообразно. При падении уровня наблюдается обратный процесс.

Достоинством подобных измерителей является возможность определения с высокой точностью положения уровня моря в момент замыкания контактов. Уровень моря определяется числом замкнутых контактов и расстоянием между ними. При наличии ветровых волн прибор не позволяет измерять уровень непосредственно. Для определения колебаний уровня моря сигналы, поступающие с датчика, подвергаются фильтрации. В этом случае регистрация колебаний с периодами более 30 с может производиться с точностью даже 1—2 мм (при расстоянии между контактами 7 мм). Однако в связи с обрастанием контактов точность измерений может резко снизиться. Поэтому приборы подобного типа требуют постоянного наблюдения за их состоянием.

*Метод измерения положения уровня моря путем регистрации изменений гидростатического давления.* Данный метод используется в океанологии и для измерения других параметров. Поэтому представляется необходимым привести здесь описание способов регистрации гидростатического давления, которые используются не только для фиксации уровня моря.

Измерение колебаний гидростатического давления чаще всего базируется на использовании упругой деформации (перемещения) чувствительного элемента под действием приложенной разности давлений, т. е. мерой приложенного давления является линейно связанная с ним деформация. Упругим элементом в датчиках давления являются мембраны (плоские или гофрированные), сильфоны и трубчатые пружины. В свою очередь размер деформации измеряется с помощью механических, электрических, магнитных, оптических и других систем, а по использованному методу преобразователи классифицируются на резистивные, индуктивные, емкостные, резонансные и пьезоэлектрические. Рассмотрим коротко упругие элементы и методы преобразования информации.

Упругая мембрана является универсальным датчиком давления. Варьируя ее толщину и диаметр, а также применяя соответствующие материалы, удается использовать датчики этого типа для очень широкого диапазона измеряемых давлений. Для получения одинаковых температурных коэффициентов расширения желательнее изготавливать мембранные преобразователи и корпуса этих преобразователей из одного и того же материала, что обеспечивает в определенной степени репрезентативность измерений.

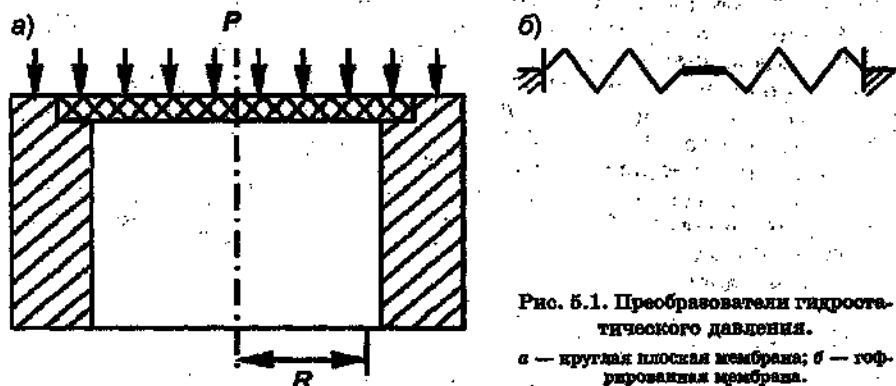


Рис. 5.1. Преобразователи гидростатического давления.

а — круглая плоская мембрана; б — гофрированная мембрана.

Возьмем плоскую круглую мембрану с жесткой заделкой в качестве чувствительного элемента, на которую действует равномерно распределенное давление (рис. 5.1 а). В случае если максимальные прогибы мембраны ( $y_0$ ) малы (сравнимы с толщиной мембраны), что обычно наблюдается в датчиках, можно записать

$$y_0 = 3P[(1 - \mu^2)/(16E)](R^4/h^3),$$

где  $P$  — давление, действующее на мембрану, кгс/см<sup>2</sup>;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль упругости материала мембраны, кгс/см<sup>2</sup>;  $R$  — радиус мембраны, см;  $h$  — толщина мембраны, см; основная резонансная частота колебаний мембраны

$$f_0 = 10,21(h/R^2) \sqrt{E/[12\rho(1 - \mu^2)]},$$

где  $\rho$  — плотность материала мембраны. При этом влияние присоединенной к мембране массы морской воды на резонансную частоту мембраны может быть учтено введением поправки

$$f = f_0(1 + \beta)^{1/2}; \quad \beta = 0,669(\rho_1/\rho)(R/h),$$

где  $\rho_1/\rho$  — отношение плотности морской воды к плотности мембраны.

Собственная частота мембраны определяет верхний частотный диапазон применения прибора. Высокие частоты можно получить путем увеличения толщины и уменьшения диаметра мембраны, что, правда, связано с уменьшением чувствительности. Практически идеальная линейность зависимости максимального прогиба мембраны



от давления обеспечивается, если размер прогиба не превышает 0,3 ее толщины.

Максимально допустимое смещение в центре мембраны можно увеличить за счет более эффективного распределения деформации по диаметру мембраны, что обеспечивает гофрированная мембрана или мембранная коробка. Перемещение центра гофрированной мембраны (рис. 5.1 б) может достигать 4 % радиуса. Профили гофров могут быть синусоидальными, пилообразными, трапециевидными. Преимущественное влияние на характеристику оказывает глубина гофрирования и число гофров при заданном диаметре мембраны. Гофрированные мембраны могут соединяться в коробку при пропорциональном возрастании перемещения центра. Мембранные анероидные коробки (рис. 5.2 а) обеспечивают большее перемещение по сравнению с максимально возможным для одиночной мембраны, но наряду с высокой чувствительностью они обладают существенной нелинейностью. Их целесообразно применять в устройствах для измерения малой изменчивости давлений, например при использовании волновых пульсаций давления.

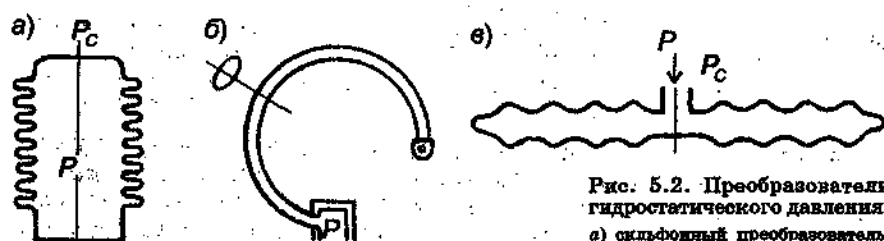


Рис. 5.2. Преобразователи гидростатического давления.  
а) сифонный преобразователь;  
б) трубчатая пружина (трубка Бурдона); в) мембранная коробка.

Самым распространенным датчиком с упругим чувствительным элементом, особенно при зондировании и исследованиях колебаний уровня, являются *сифонные преобразователи* (рис. 5.2 а), обладающие малой жесткостью и позволяющие получать большие линейные перемещения центра  $y_c$ . При гидростатическом давлении  $P$ , числе гофров, равном  $n$ , наружном радиусе  $R_n$ , внутреннем  $R_{вн}$  и толщине материала гофров  $h_c$  величина  $y_c$  определяется выражением

$$y_c = 2 \pi A_p R_n^4 / (E h_c^3),$$

$$A_p = 3(1 - \mu)(c^2 - 1 - 4c^2 \ln c) / (16c^4); \quad c = R_n / R_{вн}.$$

Сифоны часто используются в механических устройствах для измерения уровня. Их рабочий диапазон давлений составляет  $10^4$ — $10^6$  Па, а погрешность измерений 0,5—3 %.

В качестве преобразователей распространены также *трубчатые пружины*, так называемые трубки Бурдона (рис. 5.2 б), представляющие собой трубки эллиптического или овального сечения, согнутые по дуге окружности с центральным углом 180—270°. Один конец пружины неподвижен, другой связан с механической регистрирую-

щей системой. Такие С-образные трубки применяются для измерения давления от  $3 \cdot 10^4$  до  $10^8$  Па с погрешностью 0,2—4 %.

Таким образом, мерой значения давления при использовании мембранных преобразователей является упругая деформация, или максимальный прогиб. Рассмотрим несколько наиболее типичных, за исключением механических, методов регистрации размера прогиба мембраны.

**Реостатные преобразователи** отличаются простотой конструкции и используются при больших перемещениях жесткого центра (сильфоны) или некоторой точки (трубки Бурдона). Они представляют собой резистор из высокоомного провода с минимально возможным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который намотан на цилиндрический каркас с изолированными витками, а ползунок реостата скользит по очищенному от изоляции участку.

**Резистивные преобразователи** можно подразделить на проводочные и полупроводниковые тензорезисторы. Принцип действия проводочных тензорезисторов основан на изменении сопротивления металлических проводников при их деформации. Так, сопротивление проводника  $R$  определяется выражением

$$R = \rho l / S,$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление;  $l$  — длина;  $S$  — площадь поперечного сечения. При наличии продольной и поперечной деформации (растяжение и сжатие) изменяются его длина и площадь поперечного сечения, т. е. сопротивление. Металлические тензомеры обычно изготавливают из материалов с высоким удельным сопротивлением и малым ТКС (константан, манганин, никром и т. п.) в виде проводочной сетки или сетки из узких полосок фольги, наклеиваемых на подложку, или в виде тонких металлических пленок (20—50 мкм), напыляемых на непроводящую подложку, которую в свою очередь приклеивают к упругому элементу, например к мембране.

Полупроводниковые тензорезисторы имеют коэффициент чувствительности почти на два порядка выше, чем проводочные. Различают продольную, поперечную и сдвиговую тензочувствительности, характеристики которых зависят от того, каким образом тензопластика вырезана из кристалла. Обычно делают так, чтобы сдвиговая чувствительность была близка к нулю. Зависимость сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформаций в направлении продольной оси

$$R_x = R_0(1 + k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2),$$

где  $R_0$  — сопротивление ненагруженного тензорезистора;  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты;  $\varepsilon$  — относительная деформация.

Для измерения гидростатического давления довольно широко используются интегральные тензорезисторные преобразователи (ТИ), как правило, на базе монокристаллического кремния. В основном это объясняется высокой степенью изученности его характеристик и апробированностью технологии изготовления датчиков на его базе.

Наиболее полно возможности этого материала раскрылись при использовании полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) на основе гетероэпитаксиальных структур класса «кремний на диэлектрике» и особенно «кремний на серфуре» (КНС).

Временная нестабильность ТП ПЧЭ на основе структур КНС может быть не хуже  $\pm 0,005\%$  за полгода, а максимальное отклонение не превышает  $0,04\%$  диапазона измерений. В настоящее время в ТП на основе КНС используются ПЧЭ практически только в виде плоских мембран с тензочувствительной схемой. При этом ПЧЭ жестко связан с упругим элементом ТП. Одна из существенных особенностей интегральных кремниевых ТП — нестабильность схемной компенсации погрешностей (особенно температурной) измерений. Однако в настоящее время использование микропроцессоров позволяет избавиться от этих недостатков и даже расширить функциональные возможности датчиков.

В Воронежском политехническом институте разработан малогабаритный (длиной 5 мм и диаметром 0,05 мм) датчик с нитевидным кристаллом кремния в качестве первичного преобразователя. В таком датчике нитевидный кристалл кремния наклеивается на металлическую мембрану герметизированного стандартного корпуса микросхемы. Изменение гидростатического давления приводит к прогибу мембраны и соответственно к деформации растяжением наклеенного на нее нитевидного кристалла кремния и изменению напряжения на нем. Это напряжение пропорционально давлению с нелинейностью преобразования около  $10^{-3}$ . Диапазон измеряемых этим датчиком значений давления  $0-10^6$  Па с чувствительностью  $10^{-8}-10^{-7}$  В/Па.

Так же широко используются датчики давления на основе пьезорезисторного эффекта. В качестве чувствительного элемента в них чаще всего применяется тонкая кремниевая мембрана, выполняемая анизотропным травлением в кремниевой подложке  $n$ -проводимости. На поверхности мембраны с помощью диффузии или ионной имплантации формируется схема из четырех резисторов, образующих мост Уитсона. При этом резисторы располагают так, чтобы два из них испытывали растяжение, а два — сжатие. Фирма «Endevco» (США) использует в таких датчиках не однородную по толщине, а специальным образом профилированную мембрану с концентраторами механических напряжений в месте расположения тензорезисторов. Это значительно увеличивает прочность мембраны и позволяет получить более высокую чувствительность при сохранении собственной резонансной частоты либо увеличить резонансную частоту при сохранении чувствительности.

Пьезорезисторные датчики обладают широким диапазоном измерения ( $0-140$  мВ), высоким уровнем выходного сигнала ( $300-500$  мВ), высокой резонансной частотой ( $45$  кГц— $1$  МГц), высокой точностью измерений ( $\pm 0,25\%$ ), температурной компенсацией, виброустойчивостью, малыми габаритными размерами и массой (до  $11$  г).

Индуктивные преобразователи используют воздействие перемещения чувствительного элемента на один или несколько определяющих параметров магнитной цепи, что вызывает изменение ин-

дуктивности. Обычно используют дифференциальные схемы, в которых мембрана располагается между двумя катушками индуктивности, когда изменение размера прогиба одновременно увеличивает индуктивность одной катушки и уменьшает индуктивность другой.

*Резонансные преобразователи* используют струны, тонкие металлические пластины, цилиндры и пьезокварцевые пластины, в которых резонансная частота колебаний пропорциональна измеряемому давлению. Наибольшее распространение в океанологической практике нашли струнные преобразователи (вибротроны), в которых собственная частота колебаний натянутой струны  $f$  соответствует выражению

$$f = 0,5\sqrt{F/(ml)} = 0,5\sqrt{E\Delta l/(\rho l^3)},$$

где  $F$  — сила натяжения струны;  $m$  — масса;  $l$  — длина;  $\Delta l$  — удлинение струны;  $E$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность материала струны.

Прогиб мембраны вызывает изменение частоты собственных колебаний струны и силы ее натяжения (ее удлинение).

Струна изготавливается обычно в виде стальной проволоки или ленты, а ее жесткость, как правило, значительно меньше жесткости мембраны. Принцип работы устройства (рис. 5.3) следующий. Электрическая система в виде приемника (1) (катушка с сердечником), усилителя (2) и электромагнита (3) создает автоколебания струны на ее резонансной частоте. Любое случайное отклонение струны, обладающей некоторой остаточной намагниченностью, вызывает в приемнике появление электрического импульса, который после усилителя создает на электромагните магнитное поле, притягивающее струну, и процесс повторяется. Таким образом, устанавливаются незатухающие механические колебания струны на ее резонансной частоте. Частота же соответствующих колебаний несет информацию о деформации мембраны. Собственная частота струны подобных датчиков составляет несколько кГц. Погрешность составляет 1—3 %. Они используются, как правило, для измерения гидростатического давления, в том числе и в измерителях уровня.

Для измерений гидростатического давления (особенно высокоточных) в основном используют *пьезоэлектрические датчики* с применением кварцевого элемента соответствующего среза. Подобный метод позволяет фиксировать колебания уровня открытого моря на глубинах свыше 1000 м с погрешностью не хуже  $\pm 1$ —2 см. Достоинством таких датчиков являются: высокая стабильность характеристик; непосредственный выход информации; дискретность цифрового отсчета; легкость преобразования частота—код при сопряжении с каналом телеметрии. Однако выходной сигнал пьезоэлектрическо-

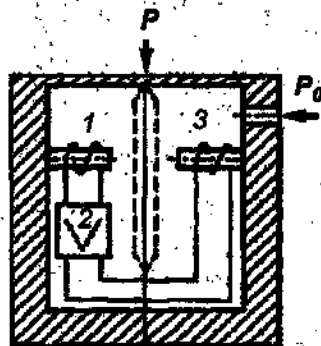


Рис. 5.3. Струнный преобразователь (вибротрон).

Усл. обозначения см. текст.

го датчика в значительной степени зависит от изменений температуры окружающей среды. Принцип действия подобных преобразователей основан на зависимости собственной резонансной частоты кварцевой пластины, являющейся их чувствительным элементом, от измеряемого давления. Для возбуждения колебаний пластины используется пьезоэффект кварца.

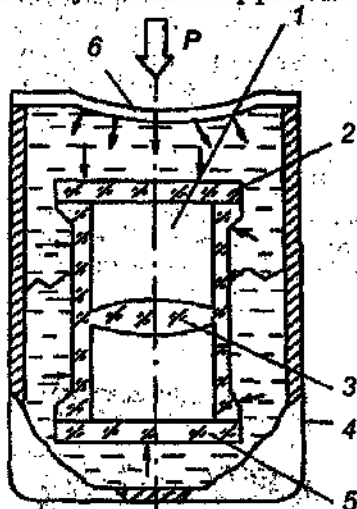


Рис. 5.4. Кварцевый преобразователь.

Усл. обозначения см. текст.

та собственных колебаний, возбуждаемых в линзе, меняется в зависимости от возрастающего давления. Для снятия этих колебаний на линзу напыляются два серебряных электрода, электрически связанных с контактами, расположенными снаружи цилиндра. Подобная система имеет добротность порядка  $10^6$ , что обеспечивает погрешность измерения уровня моря не более  $\pm 1$  см на глубинах до 5000 м. Для снижения температурной погрешности применено двойное термостатирование кварца со стабильностью до  $\pm 0,05$  °C, что обеспечивает дрейф характеристики датчика за 1 месяц не более чем на  $\pm 2$  см.

В последнее время появились разработки устранения температурной погрешности в пьезокварцевых датчиках. В частности, путем алгоритмического разделения микропроцессором информации о гидростатическом давлении и температуре чувствительного элемента, что позволяет даже расширить его функциональные возможности и измерять две физические величины одним датчиком.

Туннельный диод является весьма перспективным прибором для измерения гидростатического давления. Туннельный диод — полупроводниковый прибор, вольт-амперная характеристика которого имеет падающий участок за счет туннельного эффекта между  $p$ - и  $n$ -

Конструкция кварцевого преобразователя, например, фирмы «Хьюлетт Паккард» (по И. С. Ковчину) представляет собой (рис. 5.4) монолитный кристаллический блок (1) с внутренней линзой (3), изготовленной из одной массы кварцевого стекла. Блок цилиндрической формы герметично закрыт с обеих сторон крышками (2) и (5), вырезанными из кристалла кварца таким образом, чтобы ориентация их кристаллографических осей совпадала с направлением таковых всего кристаллического блока. Он в свою очередь располагается внутри металлического цилиндра (4), заполненного жидкостью и снабженного с одной стороны мягкой мембраной (6). Измеряемое гидростатическое давление через мембрану передается внутрь цилиндра, а заполняющая цилиндр жидкость подвергает монокристаллический кварц всестороннему сжатию. Частота

выраженными проводниками. В этом случае электроны без затраты энергии проходят через потенциальный барьер, которым является тонкий (порядка 100 Å) обедненный слой, разделяющий в туннельном диоде область с большим числом электронов в зоне проводимости материала *n*-типа и большим числом дырок в материале *p*-типа.

В общем виде принцип работы туннельного диода как датчика давления можно представить следующим образом. На рис. 5.5 приведены идеализированные вольт-амперные кривые туннельного диода, работающего в режиме усилителя. При использовании туннельного диода в качестве датчика давления параллельно ему включают сопротивление. В средней части вольт-амперная кривая горизонтальна, так как выбранное шунтирующее сопротивление равно отрицательному сопротивлению.

Колебания гидростатического давления вызывают смещение вольт-амперной кривой (штриховая линия на рис. 5.5). Это смещение и используется для измерения давления. Использование туннельного диода как датчика позволяет получать преобразователи очень малых размеров (линейный размер менее 1 мм) и с частотным выходом.

Частота в этом случае может быть линейной функцией гидростатического давления.

Согласно прогнозам организации OSLA (Великобритания), дальнейшее развитие должна получить волоконно-оптическая технология, а также датчики гидростатического давления, основанные на ее использовании.

### 5.3. Приборы для измерения уровня моря

Большое распространение на морях получили футштоки, особенно металлические рейки ГМ-3. Технические характеристики реек ГМ-3 приведены в табл. 5.1.

При необходимости на месте работ из 2-метровых блоков составляют рейки большей длины (4—12 м). Уровенные рейки ГМ-3 состоят из нескольких металлических пластин, укрепленных на металлическом основании корытного типа толщиной примерно 1 см. В отверстиях пластин размещаются фарфоровые вкладыши (по 2 см), оцифрованные через 10 см.

В последнее время уровенные рейки стали изготавливать из синтетических материалов. Они легки, не боятся обмерзания, устойчивы к

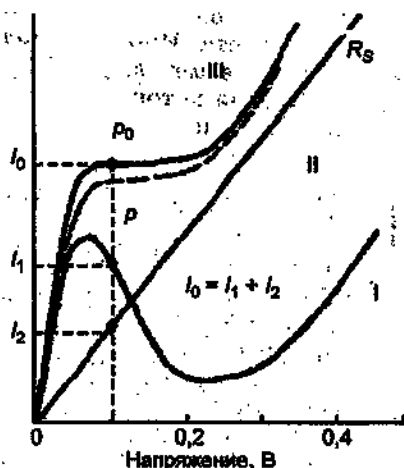


Рис. 5.5. Вольт-амперные кривые туннельного диода.

Таблица 6.1

## Технические характеристики реек ГМ-3

| Длина рейки, м | Габаритные размеры, мм | Масса, кг |
|----------------|------------------------|-----------|
| 2,0            | 2000x240x80            | 64        |
| 2,8            | 2800x240x80            | 86        |
| 4,0            | 4100x240x80            | 180       |

ударам, легкочитаемы и долговечны. Кроме того, они могут снабжаться дополнительными устройствами для регулирования высоты нуля отсчета. Иногда используются уровенные рейки с успокоителем в виде металлической трубы с калиброванным отверстием у дна, внутри которой помещается поплавок. Как правило, применяются два типа постоянных реек с успокоителем. В одних поплавки крепятся к мерной ленте, которая перекинута через блок и к другому концу которой присоединен противовес; в верхней части трубы врезано окошечко с индексом, позволяющим производить отсчеты делений мерной ленты. В рейках другого типа поплавки прикреплены к штоку, на верхнем конце которого имеется указатель, скользящий по рейке, прикрепленной к трубе. Этот тип рейки обычно используется при небольших колебаниях уровня. Существуют также и переносные рейки с успокоителем.

В качестве примера уровенной рейки с успокоителем можно привести рейку ГР-23, представляющую собой резервуар, имеющий в сечении форму ромба и изготовленный из перфорированного оргстекла. В нижней части вклеено дно с калиброванными отверстиями, через которые вода поступает внутрь резервуара. Отверстия перекрываются клапаном, который удерживается открытым при погружении рейки в воду. Отсчет производится после извлечения рейки из воды. Для удобства отсчета внутри резервуара помещен пенопластовый поплавок.

Однако при всем своем широком распространении измерения с помощью уровенных реек не лишены случайных и систематических ошибок, особенно при волнении. Отсчеты по рейке без успокоителя при волнении рекомендуется снимать при прохождении гребня и подошвы волны не менее трех раз (для большей достоверности) и за уровень моря принимают среднее значение. При этом сам принцип отсчета таит в себе возможность случайных ошибок. Кроме того, определение уровня по среднему значению из отсчетов положения гребня и подошвы приводит к систематической ошибке — завышению уровня, так как у берегов, где проводятся наблюдения, из-за некоторой заостренности гребня волны по сравнению с ее ложбиной средняя волновая поверхность располагается выше уровня спокойной воды. Это завышение зависит от высоты волны и характера изменения глубин у берега и может составлять 0,1—0,2 высоты волны у рейки в момент наблюдений.

Основным назначением *поплавковых самописцев уровня моря* является измерение и запись колебаний уровня. Из выпускаемых нашей промышленностью поплавковых мареографов (СУМ, «Валдай», ГР-88) наиболее надежным для морских условий является

Основные технические характеристики СУМ

Таблица 5.2

| Характеристика                       | Модель 1    | Модель 2 | Модель 3 |
|--------------------------------------|-------------|----------|----------|
| Диапазон измерений, м                | 0—8         | 0—6      | 0—12     |
| Погрешность измерений, % шкалы       | ±1          | ±1       | ±1       |
| Масштаб записи                       | 1:10        | 1:20     | 1:40     |
| Инструментальная погрешность         | ±80         | ±60      | ±120     |
| Погрешность хода часов за сутки, мин | ±5          | ±5       | ±5       |
| Автономность, сут                    | 7           | 7        | 7        |
| Размеры без поплавковой системы, мм  | 800×410×280 |          |          |
| Масса, кг                            | 38          |          |          |
| Длина цепи поплавковой системы, м    | 5           | 8        | 14       |
| Масса противовеса, кг                | 1,2         | 1,6      | 2,3      |

СУМ, разработанный в ГТИ в 1948 г. по модели мареографа, созданного в 1900 г. механиком ГТО К. К. Рорданцем. Изготавливаются три модели СУМ, отличающиеся диапазоном измерений (табл. 5.2).

Прибор состоит из поплавковой системы, передающего механизма и регистратора (два последних блока монтируются на массивной чугунной плите). Поплавковая система (рис. 5.6) состоит из пустого цилиндрического поплавка (8) с грузом (9), соединенных с противовесом (1) латунной цепью (7), которая переброшена через поплавковое колесо. Передающий механизм состоит из поплавкового колеса с 60 зубцами (шаг 1 см), системы шестеренок, диска с индексом (6), зубчатой рейки (5) с колонкой (4) с сантиметровыми делениями. Регистратор СУМ состоит из часового механизма, надетого на его корпус барабана (2) и рычага (3) с пером, который укреплен на зубчатой рейке.

Вертикальные перемещения поплавка с помощью цепи передаются поплавковому колесу и через систему шестеренок перемещают зубчатую

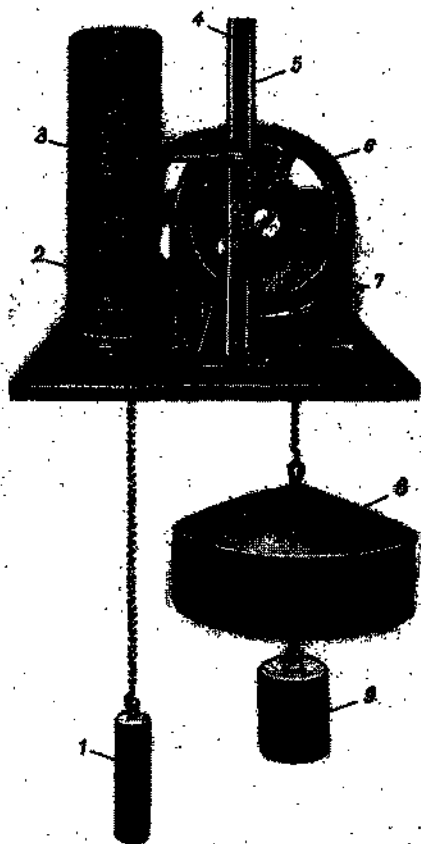


Рис. 5.6. Поплавковый мареограф СУМ.

Усл. обозначения см. текст.



рейку вместе с пером. Перо вычерчивает кривую колебаний уровня на диаграммной ленте, закрепленной на вращающемся барабане. Отсчет значений уровня по СУМ можно произвести по положению индекса на диске, по положению пластинки на колонке и по положению конца пера на ленте.

В береговой и геодезической службе США используется также переносной поплавковый мареограф, отличающийся небольшими размерами и более простой методикой установки, но, правда, имеющий меньшую точность измерений. Прибор в кожухе с поплавком диаметром 8 см устанавливается на верхнем конце трубы диаметром 10 см. Труба в своей нижней части оборудована соединительной муфтой с коническим окончанием с резьбовым отверстием, в которое вставляется втулка с отверстиями диаметром 1,25; 1,6 и 1,9 мм, предназначенными для гашения короткопериодных волновых колебаний. Труба с прибором с помощью соединительной муфты крепится на забитой в грунт трубе такого же диаметра и также имеющей отверстия для поступления воды. Поступающая информация о колебаниях уровня моря регистрируется на восковой бумаге. Прибор снабжен часовым механизмом с восьмисуточным заводом. Предусмотрена возможность подбора шестеренок для изменения масштаба записи на ленте.

Как правило, поплавковые мареографы устанавливаются над специальным колодезём, связанным с морем и защищающим поплавок от воздействия короткопериодных волн и обмерзания. В зависимости

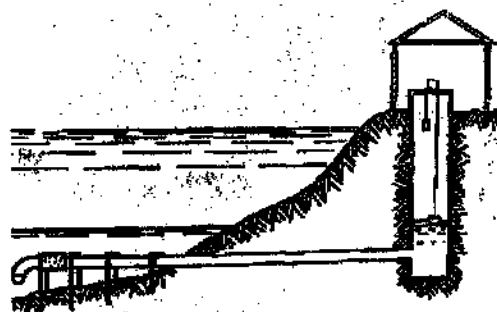


Рис. 5.7. Схема установки поплавкового мареографа.

от местных условий используются различные способы установки поплавковых мареографов в колодезях: на берегу в будке над колодезём, соединённым с морем подводной трубой (рис. 5.7); непосредственно в море (у обрывистого берега, откоса, набережной); на некотором удалении от берега на специальном сооружении. При применении двух последних способов колодезь сооружают обычно из бетонных колец на

некотором удалении от берега, над ним возводят будку, которая соединяется с берегом мостиком. Для проникновения воды в колодезь в его стенках на высоте 30—40 см над дном высверливается несколько отверстий.

Диаметр колодезя определяется размерами поплавковой системы. Диаметры подводных труб и размеры отверстий в стенках колодезя, от которых зависит степень фильтрации высокочастотной составляющей, необходимо подбирать с учетом требований к наблюдениям за уровнем и характером колебаний в месте наблюдений. Чаще всего используется труба диаметром 15—20 см, но, на-

пример, на Гогланде диаметр трубы составляет 4 см, а в Кронштадте — 50 см. Поэтому при необходимости диаметр отверстия регулируется специальной задвижкой. Длина трубы обычно от нескольких метров до 50 м.

При измерениях уровня поплавковыми мареографами возникают ошибки, вызванные погрешностями самого прибора и искажением волновых колебаний схемой установки прибора. По данным А. М. Димаксяна, максимальное значение погрешности мареографа (с учетом влияния температуры среды, но без учета погрешностей записи, люфта механизма и плотности воды) с диапазоном измерений уровня 12 м колеблется от -3,6 до 2,4 см.

Основным условием различных систем установки мареографов является быстрая передача поплавку колебаний уровня с одновременным исключением короткопериодных колебаний. С учетом этого рассчитан и масштаб времени на ленте самописца: 1 мм — 5 мин. Следовательно, колебания с периодом менее 5 мин будут на ленте сливаться. Для отфильтровывания таких колебаний размеры входных отверстий в колодце или диаметр подводящей трубы подбираются таким образом, чтобы они соответствовали наибольшему периоду исключаемых волн.

По данным А. Л. Бондаренко, в колодце мареографа происходит завышение уровня во время волнения. Степень этого завышения зависит от высоты и периода волн, диаметров колодца и входных отверстий, а также от длины и диаметра подводящей трубы. При высоте ветровых волн 2—3 м средний уровень в колодце будет отличаться от действительного на 5—7 см. Кроме того, в колодце с подводящей трубой возникают резонансные колебания, что также искажает результаты измерений. Результаты исследований А. Р. Халливела и И. Г. Перри показали, что уровень в колодце может существенно отличаться от действительного при наличии больших скоростей течения и изменений солёности в месте измерений во время прилива.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что для повышения точности измерений автоматическая запись колебаний уровня на ленте самописца должна сопровождаться выполнением контрольных измерений по рейке, хотя по своей сущности она является более грубым прибором, имеющим свои ошибки.

Принцип действия *электроконтактного самописца уровня моря АЭС-02* (ВНИПИморнефтегаз) основан на преобразовании в электрический сигнал числа замкнутых контактов, расположенных через равные интервалы по длине рейки, помещенной в демпферную трубу диаметром 10 см с узким отверстием внизу. Конструкция прибора позволяет использовать его при колебаниях уровня до 6 м в автономном режиме (до 6 месяцев) или с кабельной линией связи с выдачей оперативной информации на пульт. Малая масса и габариты АЭС-02 позволяют крепить его к любой свае, пирсу или другим опорам. Для открытых песчаных побережий можно использовать обычную штангу диаметром 0,05 м, забитую в дно.

Фирма «Плесси» (Англия) выпускает *волнограф-уровнемер* с проводочным датчиком струнного типа, прикрепленным к свае. Изменение

сопротивления струны, вызванное колебаниями уровня, модулирует частоту генератора, устанавливаемого вблизи датчика. Этот модулированный сигнал по трехжильному кабелю поступает на блок преобразования, размещенный на берегу с возможностью использования радиоканала. С выхода преобразователя информацию можно получить в цифровом виде, на магнитной ленте или на аналоговом самописце. Уровень моря определяется путем схемного осреднения волновых колебаний водной поверхности. Погрешность прибора не превышает 1 % от длины проволоки, которая может меняться от 3 до 12 м.

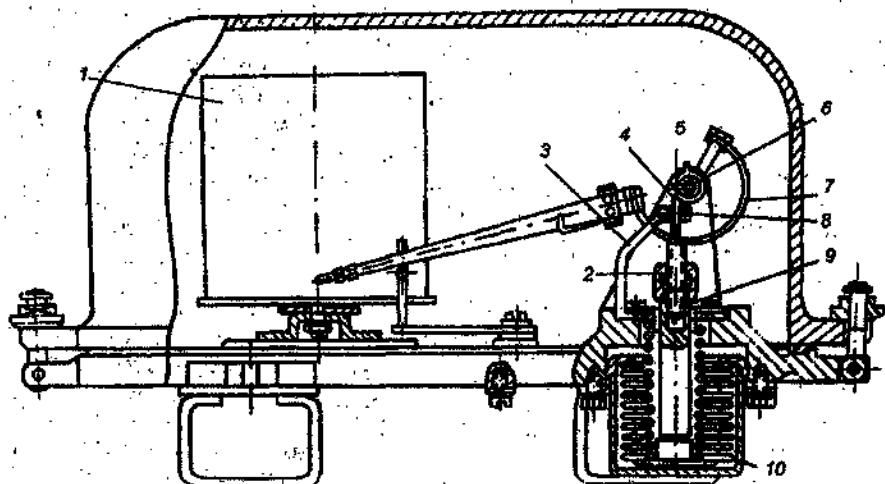


Рис. 5.8. Мареограф ГМ-28.

Усл. обозначения см. текст.

Автономный малогабаритный береговой мареограф ГМ-28 (рис. 5.8) используется в защищенных от сильного волнения портовых акваториях и бухтах на глубинах не более 10 м в малую воду. ГМ-28 — герметизированный самописец колебаний гидростатического давления, чувствительным элементом которого является подпружиненный сильфон (10), укрепленный на основании прибора. Перемещения нижнего конца сильфона, вызванные колебаниями уровня, с помощью штока (4) через рычажную систему (6 и 7) приводят в движение стрелку с пером самописца. Одно из плеч рычажной системы (7), выполненное в виде полукруглой биметаллической пластины, одновременно является компенсатором температуры. Изменяя активную длину пластины, можно регулировать термокомпенсатор. Верхняя часть штока (4) заострена и свободно упирается в приемную пластину (5) рычажной системы, что позволяет, изменяя длину штока, программировать глубину постановки. Средняя часть штока снабжена резьбой, и его длину можно изменять с помощью гайки (2), закрепленной на втулке (9) с нанесенными миллиметровыми делениями (от 0 до 10). Вся система крепится к стойке (3), в верхней

части которой расположена направляющая для штока втулка (8). Изменение длины штока производится непосредственно перед постановкой прибора. Самописец герметизируется крышкой-кожухом, которая крепится к основанию шестью откидными болтами.

Получаемая информация записывается на диаграммной ленте, закрепленной на барабане (1), приводимом в движение часовым механизмом (суточным или недельным). Сиффон закрывается защитным кожухом, в нижнюю часть которого ввинчивается пробка с отверстием, служащим своеобразным фильтром высокочастотной составляющей волновых колебаний. Диаметр отверстия определяется степенью волнения моря и может быть 0,5; 1 или 2 мм.

Мареограф выпускается в трех модификациях: ГМ-28-I с диапазоном измерений колебаний уровня 8 м; ГМ-28-II — 6 м; ГМ-28-III — 12 м. Погрешность измерения уровня составляет  $\pm 2\%$  от максимального диапазона измерений.

Мареограф прибрежный МП-I, разработанный в ТОИ РАН, предназначен для измерений колебаний уровня на глубинах до 100 м с автономностью работы 45 сут при дискретности 15 мин и 90 сут при дискретности 80 мин. Прибор устанавливается на якорь и тросом подсоединяется к плавающему на поверхности бую. Принцип работы МП-I основан на измерении гидростатического давления с помощью специально модернизированного вибротрона типа ПДВ-10А, который обладает высокой разрешающей способностью и в котором увеличена добротность струнной колебательной системы. Одновременно с измерением гидростатического давления фиксируется температура корпуса ПДВ-10А с точностью 0,01 °С. Для уменьшения погрешностей, возникающих за счет воздействия течений, поверхностных и внутренних волн, время одного измерения давления составляет около 8 мин. Чувствительность датчика давления 0,5 см.

Корпус МП-I — алюминиевый цилиндр, в котором размещены аккумуляторные батареи и электронный блок. На крышке корпуса крепятся датчики, внешний разъем и рым-болт. В состав мареографа входят: датчик давления; кварцевый датчик температуры; коммутатор, подключающий выходные сигналы датчиков на вход преобразователя «частота—код», формирующего 16-разрядный двоичный код, который записывается в твердотельное буферное запоминающее устройство с привязкой к временным меткам.

Перед началом работы внешний разъем подключается к блоку обслуживания, проверяется работоспособность прибора решением контрольной задачи, устанавливаются текущее время и дата, режим работы. По завершении измерений мареограф поднимают на борт судна и через внешний разъем с помощью специального прибора всю информацию из буферного запоминающего устройства переписывают на магнитную ленту и подают на компьютер и графопостроитель. Через разъем осуществляется также подзарядка аккумуляторов.

В ААНИИ разработан глубоководный мареограф «Геликс» на базе прибора АПИТ, предназначенный для работы на глубинах до 1000 м, с чувствительностью 0,5 см. Датчиком гидростатического давления

в приборе является манометрическая многовитковая (геликонидальная) пружина с индуктивным преобразователем и управляемой муфтой сцепления манометрической пружины с преобразователем. Подобная муфта позволяет повысить чувствительность датчика за счет исключения постоянной составляющей гидростатического давления. Недостатком системы данного типа являются наличие долгопериодного дрейфа градуировочной характеристики, малая устойчивость к вибрациям, сложность обслуживания и низкая экономичность энергопитания.

Для измерения уровня моря на глубинах до 1000 м в ААНИИ был разработан *мареограф «Цунами»* с записью получаемой информации во внутреннюю полупроводниковую память и с передачей ее по гидроакустическому каналу связи на поверхностный буй. Прибор позволяет производить измерения колебаний уровня в диапазоне  $\pm 3$  м с погрешностью  $\pm 4$  см и температуры окружающей среды для введения температурной поправки в показания датчика давления. Дискретность измерений составляет 1, 10, 30 или 60 мин с автономностью работы 1 год. Емкость внутренней памяти мареографа составляет 6144 цикла измерений. Общая масса прибора не превышает 30 кг.

Стальной корпус мареографа представляет собой цилиндр с наружным диаметром 0,17 м и высотой 0,65 м. На его верхней крышке помещены датчики гидростатического давления и температуры, а также пьезоизлучатель гидроакустических сигналов. Датчик давления — вибростержневой вакуумированный преобразователь частотного типа ПДВ-100В в пассивном пенопластовом термостате с основной погрешностью измерения 0,15 % от верхнего предела измерения. Датчик температуры — полупроводниковый терморезистор типа ММТ-4Е-22, включенный в цепь положительной обратной связи автогенератора на операционном усилителе с мостом Вина, обеспечивает измерение с разрешающей способностью  $\pm 0,02$  °С и возможностью внесения поправок в показания канала давления. Внутри корпуса размещены: электронная схема, блок магнитной памяти и блок питания (12 батарей типа 165У с общим напряжением 18 В).

*Мареограф SIS-13* фирмы «Сьюбер» (Франция) рассчитан для работы на глубинах до 3000 м. В качестве датчика гидростатического давления используется кварцевый резонатор, обеспечивающий погрешность измерения уровня не менее  $\pm 2$  см.

*Мареограф WLR5* фирмы «Ондеро инструментс» (Норвегия) рассчитан для работы на глубинах до 600 м и позволяет проводить измерения колебаний уровня и температуры воды. В качестве датчика гидростатического давления используется кварцевый резонатор с погрешностью не хуже  $\pm 0,6$  см. В качестве датчика температуры используется термистор с погрешностью  $\pm 0,04$  °С. Получаемая информация откладывается в магнитную память 10-разрядным кодом. Кроме того, приборы данной фирмы снабжаются гидроакустическим каналом связи с дальностью 800 м на частоте (16 384 $\pm$ 5) Гц. В качестве материала для изготовления

корпусов приборов используется алюминиевый сплав 6061/Т6, стойкий к морской воде. Вес WLR5 на воздухе — 46 кг. В новой модификации WLR7 дополнительно установлен канал измерения электропроводимости, а дальность гидроакустического канала связи доведена до 2 км.

*Измерители волн цунами.* В настоящее время на сети Росгидромета чаще всего используются поплавковый регистратор цунами ГМ-23-I, гидростатический регистратор цунами ГМ-23-II и сигнализатор цунами ГМ-30.

ГМ-23-I изготовлен на базе мареографа СУМ. Различие между ними заключается в том, что для лучшей расфигуровки записи цунами в нем увеличена скорость вращения барабана, а для сигнализации об экстремальных значениях уровня в регистраторе установлены электрические контакты, включающие звонок, зуммер, сирену и т. п. Регистрирующая часть прибора помещена в литой герметичный корпус для предохранения при прохождении волн цунами. Прибор устанавливается в бетонированной будке над колодезем, соединенным с морем с помощью трубы. Бетонированные установки должны выдерживать динамический напор волн цунами при их накате на берег.

ГМ-23-II изготовлен на базе мареографа ГМ-28 и предназначен для регистрации волн цунами, высота которых превышает наибольший приливный уровень. Так как волны цунами наблюдаются сравнительно редко, в приборе предусмотрено специальное пусковое устройство, состоящее из открытых электродов и электромагнитного пускового реле. При подъеме уровня, превышающем максимальную высоту прилива, морская вода замыкает электроды, что заставляет срабатывать реле и включать часовой механизм прибора. Регистратор монтируется внутри специального бетонного основания. Прибор рассчитан на регистрацию высоты уровня до 10 м. Скорость вращения барабана увеличена в нем до 2,5 мм/мин.

ГМ-23-I и ГМ-23-II могут использоваться совместно и устанавливаться каскадом так, чтобы включение одного из них происходило до того, как перестал регистрировать другой. Перекрытие диапазонов измерения должно составлять 30—50 см, что обеспечивает непрерывность записи прохождения волн цунами.

Для подачи предупредительных сигналов о приходе опасных волн цунами используется *сигнализатор волн цунами ГМ-30*, выполненный в виде приставки к поплавковому измерителю. Принцип действия его основан на определении скорости изменения уровня с помощью магнитно-механической измерительной системы.

## Глава 6

### МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ

#### 6.1. Поле температуры

Температура воды Мирового океана — один из основных параметров океанической среды, меняющийся в сравнительно широких пределах как во времени, так и в пространстве. В высоких широтах в период льдообразования значение температуры поверхности воды в зависимости от ее солености может составлять  $-1,8...1,9^{\circ}\text{C}$ , что соответствует нижней границе ее изменчивости. Температура поверхностных вод в тропической зоне океана не превышает обычно  $30^{\circ}\text{C}$ , а в таких районах, как Карибское, Красное моря, Персидский залив, она может достигать и  $32^{\circ}\text{C}$ , что соответствует верхней границе ее изменчивости. Средняя температура вод океана составляет  $8,18^{\circ}\text{C}$ . Суммарный поток тепла через водную поверхность складывается из следующих компонентов: коротковолнового электромагнитного излучения Солнца; длинноволнового излучения океана; затрат тепла на испарение с поверхности океана; контактного теплообмена между океаном и атмосферой.

Из поступающей к водной поверхности солнечной радиации примерно 8 % отражается в атмосферу, остальная проникает в водную толщу. При этом около 60 % проникающей радиации поглощается верхним метровым слоем воды. Среднегодовое распределение проникающей радиации имеет зональный характер. Обратное излучение океана составляет 42 %, испарение 51 %, контактный теплообмен 7 %. В умеренных и высоких широтах суммарное действие этих факторов преобладает над поступлением в океан солнечной радиации.

Температурное поле поверхности океана определяется зональным компонентом и течениями. Воздействие течений проявляется как в понижении, так и в повышении температуры в зависимости от района океана.

Общая картина вертикального распределения температуры воды подчинена единой схеме. Теплая тропическая вода занимает в океане сравнительно тонкий приповерхностный слой, который отделен от нижележащих холодных слоев главным термоклинном — слоем повышенных значений вертикального градиента температуры. На экваторе термоклин приподнят, а в субтропиках заглублен и выходит к поверхности океана в умеренных широтах. Эта структура термоклина определяется связью поля плотности воды с полем крупномасштабных течений.

Сезонные колебания температуры обычно охватывают сравнительно тонкий слой воды до глубины 200—400 м. В ряде внутренних

морей и полярных водоемах зимняя вертикальная конвекция достигает больших глубин, а иногда проникает и до дна. В умеренных и полярных областях верхний слой составляет несколько десятков метров, а в тропических районах достигает 100 м и более. В наиболее глубоких слоях океана преимущественное влияние на распространение температуры оказывает процесс распространения приполярных донных вод.

Результаты наблюдений показали, что вертикальное распределение температуры воды характеризуется нестабильностью с вертикальными масштабами от сантиметров до сотен метров. Тонкая структура стратификации температуры представляет собой неупорядоченное или систематическое чередование по глубине участков с низкими и высокими вертикальными градиентами. Наибольший из зарегистрированных в термоклине вертикальных градиентов температуры в слое толщиной менее 1 см достигает  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{см}$ . В то же время в океане можно наблюдать полностью изотермические слои, характеризующиеся нулевым вертикальным градиентом температуры. В океане могут встречаться и слои с обратным градиентом температуры. Максимум зарегистрированного вертикального градиента температуры в таких слоях достигает  $0,024^{\circ}\text{C}/\text{см}$ .

В океане неоднородности стратификации температуры как неупорядоченного, так и ступенчатого характера распространяются до самых больших глубин. Однако амплитуда большинства неоднородностей тонкой структуры имеет тенденцию убывать с глубиной.

Температура, являясь термодинамической величиной, характеризует состояние термодинамического равновесия как всей океанической системы, так и отдельных ее частей, т. е. температура определяет направление передачи энергии путем теплообмена, а эта передача осуществляется от объемов с большей температурой к объемам с меньшей температурой.

## 6.2. Методы измерения температуры воды

Изменение температуры объема воды приводит к изменению всех ее свойств и практически все характеристики воды становятся функцией температуры. Подобные изменения происходят с любым веществом. Поэтому в качестве термометрических выбираются такие вещества, которые с изменением температуры довольно сильно и линейно меняют свои свойства. Кроме того, для целей термометрии можно использовать и зависимость оптических, электрических, акустических и других характеристик водной среды от изменений температуры. Все это является необходимым условием, так как температуру нельзя измерить непосредственно и ее значение определяется по изменению какой-либо физической характеристики термометрического вещества.

Основой измерения температуры является *температурная шкала*, построенная по нескольким опорным точкам, неизменность которых подтверждается общими физическими законами.



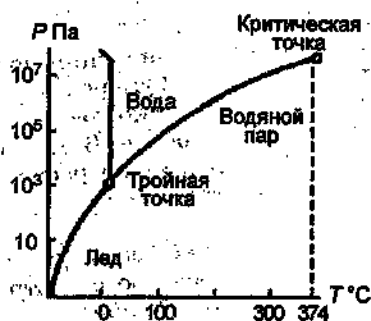


Рис. 6.1. Тройная точка воды.

становлена Международная практическая температурная шкала (МПТШ). Так, основная МПТШ 1968 г. опирается на шесть опорных точек, воспроизводимых равновесными состояниями и приписанных определенным значениям температур, и эталонные приборы, градуированные при этих температурах. Эталонные приборы необходимы для осуществления интерполяции между температурами опорных точек.

*Измерение температуры воды в Мировом океане* имеет определенные особенности. Как уже отмечалось, температура океанической воды подвержена существенным колебаниям как во времени, так и в пространстве. Температуру воды можно измерять различными способами, использующими разнообразные физические принципы и, конечно же, обладающими различными точностными характеристиками. Методы измерения температуры воды подразделяются на *контактные* и *неконтактные*.

*Контактный метод* основан на введении в исследуемую среду измерительного зонда, содержащего соответствующий термометрический элемент. В качестве подобного элемента используют жидкостные (ртутные) термометры расширения, металлические деформационные термометры, термоэлектрические термометры (термопары), проволочные и полупроводниковые термометры сопротивления, кварцевые термометры. В этом случае за температуру среды принимают температуру измерительного зонда. Значения температуры могут регистрироваться как неподвижными, так и движущимися измерительными системами. При этом в первом случае значение принимаемого сигнала определяется амплитудой и периодом флуктуаций температуры, а во втором — в основном линейными размерами температурных неоднородностей, хотя при определенных обстоятельствах и здесь оказывают влияние амплитуда и период флуктуаций.

*Неконтактные методы* основаны на измерении термометрических свойств самой среды, т. е. используется собственное тепловое излучение водной поверхности в инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра электромагнитных волн, которое является функцией термометрических свойств среды.

Термометрические элементы, предназначенные для измерения температуры, обычно называют *датчиками*, или *первичными измеритель-*

Таковыми точками могут быть значения температур кипения или затвердения чистых веществ. С помощью различных термометрических веществ можно построить различные шкалы. Наибольшее распространение получила шкала Кельвина — термодинамическая шкала температур, за основу которой принята одна опорная точка — тройная точка воды со значением температуры 273,16 К (рис. 6.1). Длина этой шкалы от абсолютного нуля до бесконечно больших температур. На основе термодинамической шкалы у-

ными преобразователями. При измерении температуры морской воды во всей ее толще для предохранения датчиков от воздействия агрессивной среды, которой является морская вода, и гидростатического давления их помещают в специальный кожух. Это увеличивает размеры датчика, приводит в какой-то мере к пространственному искажению поля температуры и увеличивает тепловую инерцию, т. е. увеличивает время запаздывания принятия датчиком температуры окружающей среды. Подобные недостатки становятся в итоге основными источниками погрешностей при исследовании пространственно-временной изменчивости полей температуры в Мировом океане.

При измерении температуры воды контактными измерителями в море возникает вопрос о соответствии температуры датчика температуре исследуемой среды. При изменении температуры водной среды, что обычно наблюдается в океане, температура датчика всегда отстает от температуры воды. Пусть датчик в защитном корпусе имеет температуру  $T$ , площадь поверхности  $S$  и помещен в воду с температурой  $T_0$ . Тогда количество тепла  $dQ$ , получаемое датчиком за единицу времени  $t$ , определяется как

$$dQ/dt = \alpha S(T_0 - T),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи. Если в датчике поле температуры однородно, можно считать, что все это тепло идет на изменение его температуры  $dT$ , т. е.

$$dQ = c_p V dT,$$

или

$$dQ = mcdT,$$

где  $c$ ,  $\rho_d$ ,  $V$  и  $m$  — удельная теплоемкость, плотность, объем и масса датчика соответственно.

Отсюда

$$mcdT/dt = \alpha S(T_0 - T).$$

Введя обозначение  $\tau = mc/(\alpha S)$ , получаем

$$\tau = (T_0 - T)dt/dT. \quad (6.1)$$

Величина  $\tau$ , имеющая размерность времени, носит название *постоянной времени датчика*, а коэффициент тепловой инерции определяется скоростью изменения температуры датчика при единичной разности температур между ним и средой. Согласно выражению (6.1), величина  $\tau$  является функцией инерционности датчика, однако следует подчеркнуть, что свое особое влияние оказывает и скорость обтекающего датчик потока.

При конструировании аппаратуры для измерения температуры морской воды следует учитывать ряд следующих факторов. Термочувствительный элемент обычно имеет арматуру, предохраняющую его от воздействия агрессивности морской воды, гидростатического давления, набегающего потока и механических повреждений. Датчик, как правило, имеет тепловой контакт с массивным корпусом

измерительного устройства. Параметры теплообмена датчика и среды являются переменными. Размеры датчика обычно приводят к пространственному искажению поля температуры. Тепловая инерция и ее изменчивость в режиме обтекания, а также конечные размеры датчика температуры оказываются основными источниками погрешностей при изучении пространственно-временной изменчивости поля. Эти погрешности относятся к погрешностям динамического характера. Тепловой контакт между датчиком и массивным корпусом приводит к методическим погрешностям.

Наиболее распространенными из-за своей простоты являются *жидкостные стеклянные термометры*, в которых используется зависимость между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в резервуаре, жестко соединенном со связанным с температурной шкалой капилляром. В качестве термометрической жидкости чаще всего используют не смачивающую стекло чистую и осушенную ртуть, что позволяет получать довольно высокую чувствительность за счет использования капилляров с малым диаметром (около 0,1 мм). Кроме того, ртуть обеспечивает хорошую линейность шкалы. В качестве термометрического вещества применяются также керосин, толуол, спирт, пентан. Однако они обладают большей тепловой инерцией за счет большей вязкости и худшей теплопроводности. Средний коэффициент объемного теплового расширения  $\beta$  в диапазоне температур от нуля до  $T$  определяют по формуле

$$\beta = (V_T - T_0)/(V_0 T).$$

Стекло, используемое для изготовления капилляров термометров, также должно отвечать определенным требованиям. Оно, например, должно обладать минимальным термическим старением. В противном случае это явление может привести к изменению объема резервуара с ртутью. Кроме того, одновременно с изменением объема термометрической жидкости меняется и объем корпуса термометра, т. е. термометр на самом деле регистрирует «видимый» коэффициент расширения, равный сумме истинных коэффициентов расширения жидкости и стекла. Так, для ртути коэффициент объемного теплового расширения имеет значение порядка  $0,00018^\circ\text{C}^{-1}$ , а для стекла —  $0,00002^\circ\text{C}^{-1}$ .

*Металлические (деформационные) термометры* чаще всего изготавливают из биметаллических элементов, состоящих из металлов с резко отличающимися коэффициентами теплового расширения. Так, например, для изготовления термометров можно использовать материалы с большим коэффициентом расширения: латунь, никель, сталь и т. п. — и с малым коэффициентом расширения: инвар. Биметаллические термометры изготавливают обычно из двух прочно соединенных, примерно равных по толщине слоев, материалов в виде пластин, дужки или диафрагм. С изменением температуры, из-за различия коэффициентов расширения, эти элементы изгибаются (деформируются) в сторону слоя с меньшим тепловым расширением и приводят в действие механическую или электрическую системы

регистрации. Благодаря своей простоте, компактности и дешевизне, несмотря на невысокую точность, биметаллические термометры широко используются при измерении температуры в жидкостях и газах.

**Термоэлектрические термометры** основаны на использовании открытого в 1821 г. явления термоэлектричества (эффект Зеебека). Если два проводника (рис. 6.2) из разных материалов (А и В) соединены концами в замкнутый контур и места соединений находятся при разных температурах, то в контуре возникает электрический ток. Оба соединенных проводника, называемые термоэлектродами, образуют термопару. Одно из мест спайки проводников, помещенное в среду с измеряемой температурой, называется рабочим концом термопары, а второе, находящееся при постоянной известной температуре, — свободным концом термопары. Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), возникающая в цепи термопары, зависит от температуры рабочего ( $T$ ) и свободного ( $T_0$ ) концов, а также от свойств материала термоэлектродов.

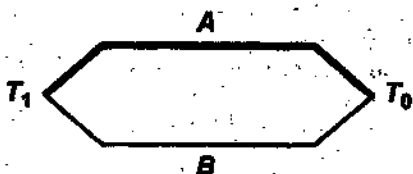


Рис. 6.2. Термопара.

Объяснение термоэлектрического эффекта связано с представлением о наличии в металлах свободных электронов. Количество электронов в единице объема материала зависит от состава вещества и его температуры. Если существует электрический контакт между двумя материалами с различными концентрациями свободных электронов, то возникает диффузия из материала А в материал В. Это в свою очередь способствует появлению разности потенциалов между ними, препятствующей диффузии. А при небольшой разности температур между рабочим и свободным спаями разность потенциалов будет пропорциональна возникающей ТЭДС ( $E$ ) и коэффициенту термоэлектрической способности термопары  $\alpha$ .

$$E = U_A - U_B = \alpha(T - T_0).$$

Коэффициент  $\alpha$  постоянен только при небольшом перепаде температур, так как он сам в общем случае зависит от температуры.

В качестве материала для измерительных термопар выбираются материалы с постоянным  $\alpha$  в достаточно широком диапазоне температур. Из наиболее распространенных термопар можно отметить медь-копелевую термопару, изготавливаемую из медной (марки М1) проволоки диаметром 0,2 — 0,5 мм и сплава копель (марки МНМц 48—0,5). Зависимость ТЭДС от температуры  $T$  описывается уравнением

$$E = 42,68T + 5,08T^2 - 4,5105T^3, \text{ мВ.}$$

Допустимые отклонения  $\Delta E$  измеряемых значений ТЭДС от основных значений  $E$  в рабочем диапазоне температур составляет  $\pm 0,055$  мВ.

Высокой линейностью и довольно высокой ТЭДС отличается хромель-копелевая пара [тип ХК(L)]. Наиболее точная и более изученная — платинородиевая пара (платина + 10 % родий/платина). Термопары из благородных материалов и сплавов обладают наиболее

высокой точностью (стабильностью и воспроизводимостью), хотя в общем их ТЭДС ниже, чем у термопар из благородных металлов.

Для увеличения чувствительности в малом диапазоне температур соединяют несколько термопар (рис. 6.3) и получают термобатарею. Ток, регистрируемый при этом измерительным прибором, будет

$$I = n\alpha(T - T_0)/(R_{\Pi} + nR_{\text{ТП}} + r),$$

где  $n$  — число термопар;  $R_{\Pi}$ ,  $nR_{\text{ТП}}$ ,  $r$  — сопротивление прибора, термопары и подводящих проводов соответственно. ТЭДС батареи равна сумме ТЭДС пар, но ее постоянная времени больше, чем у отдельной термопары.

*Термометры сопротивления* используют эффект зависимости электрического сопротивления различных веществ, металлов и их полупроводников от их температуры. Эта зависимость характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), определяемым как относительное приращение электрического сопротивления вещества при изменении его температуры на единицу:

$$\alpha = (1/R)(dR/dT), \quad (6.2)$$

где  $R$  — сопротивление вещества при температуре  $T$ .

Термосопротивления используют в качестве как образцовых, так и рабочих приборов самого различного назначения. В качестве материалов для термосопротивлений пригодны только те, физические и химические свойства которых не изменяются с течением времени в исследуемом диапазоне температур. Сопротивление такого материала должно хорошо воспроизводиться и с изменением температуры монотонно и линейно возрастать или уменьшаться. Кроме того, внешние воздействия (давление, влажность, деформация, коррозия) не должны оказывать влияния на сопротивление термометра. Для получения хорошей временной стабильности отношения входного и выходного сигналов термосопротивления должны быть хорошо стабилизированы (искусственно состарены). ТКС, так же как и удельное сопротивление датчика, должны быть, по возможности, больше, чтобы сам термопроводник занимал как можно меньший объем.

В океанологической практике широкое применение нашли про-

волочные и пленочные (ПТС) и полупроводниковые (ППТС) термометры сопротивления. Простота конструкций датчиков и их измерительных схем, высокие точность и разрешающая способность, возможность уменьшения постоянной времени — все эти качества способствовали широкому внедрению термосопротивлений в океанологическую технику.

Конструктивно ПТС, как правило, представляют собой бифилярную спираль, намотанную на

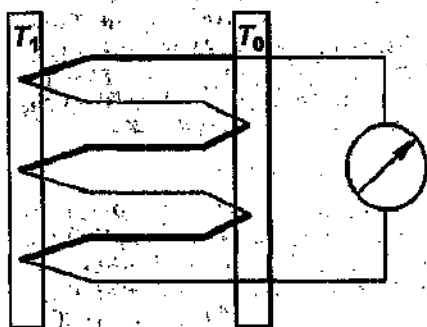


Рис. 6.3. Термобатарея.

Таблица 6.1

Термометрические характеристики материалов

| Материал         | Интервал температур, К | ТКС, $K^{-1} \cdot 10^{-3}$ (средний для интервала 0—100 °C) | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) (для 0 °C) | Удельное электро-сопротивление, Ом·м (для 20 °C) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) |
|------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| Платина          | 13—1600                | 3,93                                                         | —                                                 | 0,0866                                           | 136                              |
| Медь (99,9 %)    | 13—700                 | 4,27                                                         | 386                                               | 0,0168                                           | 377                              |
| Никель (97—99 %) | 210—600                | 6,34                                                         | 58                                                | 0,1380                                           | 461                              |
| Вольфрам         | До 1800                | 4,40                                                         | —                                                 | —                                                | —                                |
| Железо           | До 450                 | 6,57                                                         | —                                                 | —                                                | —                                |
| Золото           | —                      | 3,77                                                         | —                                                 | 0,0237                                           | 134                              |

жесткое основание или отрезок проволоки, которые помещают в защитный корпус, чаще всего в виде трубки. В качестве термометрического элемента используются платина, медь, а в последнее время никель и вольфрам. Характеристики некоторых термометрических материалов приведены в табл. 6.1.

Температурный коэффициент сопротивления для большинства металлов в принципе постоянен в большом диапазоне температур, следовательно, проинтегрировав выражение (6.2), получим

$$R = R_0 e^{\alpha \Delta T}, \quad (6.3)$$

где  $\Delta T = T - T_0$  — интервал изменения температур. Если разложить показательную функцию в ряд и ограничиться двумя первыми членами разложения, то для ряда металлов, например платины и меди, в диапазоне изменчивости температуры  $-4...38$  °C с достаточной степенью точности можно записать

$$R = R_0(1 + \alpha T), \quad (6.4)$$

где  $R_0$  — сопротивление при температуре 0 °C.

Прочный корпус датчиков температуры изготавливают из стали, а для уменьшения тепловой инерции иногда используют золото. В целях увеличения теплопроводности внутреннее пространство между самим датчиком и его корпусом заполняют трансформаторным или силиконовым маслом или специальной пастой с высокой теплопроводностью.

Наибольшее распространение в качестве термометрического материала благодаря высокой химической стабильности, линейности, температурной зависимости сопротивления, хорошей обрабатываемости, а также устойчивости против воздействия окружающей среды получила платина. Платина высокой степени химической чистоты с ТКС  $\alpha = 3,926 \cdot 10^{-3} K^{-1}$  используется для воспроизведения МПТП в диапазоне  $-260...630$  °C. Из нее изготавливают образцовые и эталонные термометры сопротивления.

Нашей промышленностью выпускаются несколько типов платиновых ПТС для океанографических исследований. Основные технические характеристики некоторых ПТС приведены в табл. 6.2.

Конструктивно платиновые ПТС типа ТСП-365-01, предназначенные для глубоководных океанологических исследований, выполне-

Таблица 6.2

## Технические характеристики платиновых ПТС

| Тип ПТС    | Диапазон<br>измеряемых<br>температур,<br>°C | Материал<br>датчика<br>и защитного<br>кожуха | Сопротивление<br>при 0 °C,<br>Ом | Тепловая<br>инерция,<br>с, не более | Допустимая<br>погрешность,<br>°C | Максимальная<br>глубина<br>погружения,<br>м |
|------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| ТСП-7115   | -2...40                                     | Платина<br>Сталь<br>12×18Н10Т                | 500                              | 10,0<br>30,0                        | ±0,15 (-2+40)                    | 650                                         |
| ТСП-365-01 | -2...32                                     | То же                                        | 100                              | 0,5                                 | ±0,02                            | 6000                                        |

ны в виде жгута из платиновой проволоки марки ПЛ-0 диаметром 0,05 мм, длиной около 2 м, покрытой лаком ВЛ-931, и помещены в герметичную капиллярную трубку из нержавеющей стали. Внутренняя полость этой трубки заполнена теплопроводной пастой. Данные термометры серийно выпускаются НПО «Термоприбор».

В 1985 г. Н. Бауман с сотрудниками и В. Кроебол предложили платиновый ПТС с сопротивлением 10 Ом и постоянной времени около 2 мс. Конструктивно термометр представляет собой короткий отрезок открытой платиновой проволоки. Зависимость показаний термометра от давления является линейной и воспроизводимой, легко вычисляется и корректируется. Благодаря подобному сопротивлению термометра шунтирующее влияние морской воды незначительно. Оно легко может быть вычислено и скорректировано по измеренной удельной электропроводности. Нестабильность термометра не более 2 мК в неделю. Для повышения долговременной стабильности измерений температуры используется второй (стоимый) платиновый ПТС с временной нестабильностью не более 2 мК в год.

На втором месте по использованию в качестве термометрического вещества стоит медь. Сопротивление меди с изменением температуры в рабочем диапазоне меняется практически линейно. При температуре 20 °C ТКС меди больше ТКС платины  $((4,26-4,28) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1})$ . Для понижения постоянной времени чувствительный элемент может быть изготовлен из тонкой (диаметром около 0,02 мм) изолированной медной проволоки, сотканной на основе капроновой нити в виде тонкой ленты. Такой датчик обладает постоянной времени порядка 0,02 с, стабильность показаний в рабочем диапазоне температур достигает  $\pm(0,01-0,05) \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Никель имеет хорошую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, обрабатывается в холодном состоянии, ТКС равен  $(5,2-6,9) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , что способствует более высокой чувствительности по сравнению с платиновыми и медными ПТС. Но возникают трудности с получением химически чистого никеля (что сказывается на стабильности во времени), калиброванной проволоки для изготовления датчиков (что ведет к разбросу механических и электрофизических свойств).

До сих пор в технике измерений температуры морской воды оптимальными остаются точность до  $10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$  и стабильность 0,01 °C в год. Использование металла в качестве чувствительного элемента позволяет получить ПТС с высокой точностью, стабильностью, чув-

ствительностью, воспроизводимостью характеристик, а также простым математическим выражением для кривой зависимости сопротивления от температуры окружающей среды.

К недостаткам ПТС можно отнести малую крутизну преобразования, обусловленную сравнительно небольшой величиной  $\alpha$  для металлов (порядка  $10^{-5}$  град $^{-1}$ ) и малым собственным сопротивлением, что усложняет передачу информации от датчика на измерительные схемы. Кроме того, ПТС обладает относительно большим значением постоянной времени.

При изучении микроструктуры полей температуры для уменьшения постоянной времени перспективным является использование микроэлектроники в части тонко- и толсто пленочной технологии при создании чувствительных элементов. Они изготавливаются методом напыления платины или других металлов на каркас из изоляционного материала. Подобные технологии позволяют получать миниатюрные (размеры не превышают первых см), малоинерционные (мс), высокотехнологичные и относительно дешевые элементы. При этом появляется возможность максимально автоматизировать процесс производства датчиков и получать их с заранее заданными характеристиками (ТКС, номинальное сопротивление и постоянная времени). Используя подобные термометры в такой агрессивной среде, как морская вода, следует применять защиту чувствительных элементов в виде кварцевой пленки или тонкой пленки различных лаков, напыляемых поверх металлов.

*Полупроводниковые термометры сопротивления (ППТС)* имеют значительно большую крутизну преобразования, т. е. более высокий ТКС (до 6—8 % на 1 °C) и большое удельное сопротивление. Все это позволяет изготавливать термометры очень малых размеров с высокой чувствительностью, пригодные для измерения малых градиентов температуры, облегчает конструирование телеизмерительных систем и регистраторов, что разрешает использовать их непосредственно в качестве задающих резисторов в измерительных генераторах. Измерение температуры путем преобразования сопротивления ППТС в частоту с помощью RC-генератора обеспечивает высокую помехозащищенность, удобство передачи, регистрации, анализа результатов измерений и весьма перспективно.

В последнее время широкое распространение получили полупроводниковые термосопротивления (термисторы), выполненные на основе германия, кремния, оксидов металлов и т. п. Малая тепловая инерция ППТС (до 20 мс) и высокое разрешение (порядка  $5 \cdot 10^{-4}$  °C) позволяют использовать их для измерения флуктуаций температуры в море при исследовании тонкой структуры, а также для коррекции термических погрешностей датчиков электропроводности.

Зависимость температурного коэффициента термистора  $\alpha_T$  от температуры можно представить в виде

$$\alpha_T = B/T^2,$$

где  $B = \Delta E/(2K)$  — постоянный коэффициент для каждого конкретного полупроводника;  $E$  — энергия активации;  $K$  — постоянная



Больцмана. Зависимость сопротивления термистора  $R_T$  от температуры определяется как

$$R_T = AT^b e^{B/T}, \quad (6.5)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные коэффициенты. Обычно при практических расчетах в небольших интервалах температур ( $20-30^\circ\text{C}$ ) величиной  $T^b$  пренебрегают, так как  $b \ll 1$ . Тогда выражение (6.5) примет вид, аналогичный (6.4) для ПТС, т. е.

$$R_T = Ae^{B/T}.$$

Значения постоянных коэффициентов здесь можно определить путем измерения сопротивлений при двух известных значениях температуры.

К недостаткам ППТС в первую очередь следует отнести нелинейность их температурной характеристики (их чувствительность меняется на различных участках диапазона измерений) и временной дрейф (изменение характеристик с течением времени). Все это заставляет использовать ППТС в случае допустимой невысокой точности при необходимых высоком разрешении и малой постоянной времени. Правда, современные полупроводниковые термисторы не уступают платиновым ПТС. Кроме того, можно использовать узкий диапазон измерений, где нелинейность была бы ниже допустимой погрешности, или искусственно линеаризовать термисторную характеристику с помощью различных существующих в настоящее время методов. При изучении влияния гидростатического давления на ППТС было установлено, что изменение давления приводит к изменению их сопротивления, которое эквивалентно изменению температуры на  $1,5 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}$  на 1 атм в диапазоне  $0-700$  атм.

В последнее время для коррекции динамических характеристик ПТС с целью приближения их тепловой инерции к постоянной времени датчиков электропроводности стали практиковать совместное использование ПТС и ППТС. Наиболее удачно это реализовано Брауном в СТД-системе MARK-III, где для коррекции постоянной времени 250 мс платинового ПТС со 100-омным чувствительным элементом использован миниатюрный термистор с постоянной времени 25 мс. На термистор, установленный в непосредственной близости от платинового ПТС, подается питание через интегратор с постоянной времени ПТС (250 мс). Такое совместное использование ПТС и ППТС в одном измерительном канале позволяет успешно сочетать высокую долговременную стабильность и линейность выходного сигнала с малой инерционностью ППТС.

*Термочувствительные кварцевые резонаторы*, применяемые в виде термометров, используют температурную зависимость упругой постоянной пьезокристаллов, в основном кварца, имеют высокую добротность, стабильность параметров (максимальный дрейф после начального периода старения кристалла имеет значение порядка  $10^{-3}$  К в месяц), обладают высоким разрешением ( $10^{-4}-10^{-6}$  К) с абсолютной погрешностью в рабочем диапазоне температур до  $0,02^\circ\text{C}$ . Кварцевые термометры пригодны для эксплуатации при наличии ударов и вибра-

ций (10—1000  $q$ ) и имеют постоянную времени 1—5 с. Еще одно важное преимущество — это то, что их чувствительный элемент — термочувствительный срез пьезокристалла — является частотно-термочувствительным элементом с высокой добротностью и стабильностью и может быть использован непосредственно в качестве частотно-задающего элемента в системах телеизмерений с частотной модуляцией.

Кристалл кварца ( $\text{SiO}_2$ ) представляет собой шестигранную призму, ограниченную двумя пирамидами. В кристалле кварца различают (рис. 6.4 а) взаимно перпендикулярные оптическую ось  $Z$ , три электрические оси  $X$  (проходят через вершины шестигугольника поперечного сечения) и три механические оси  $Y$  (проходят перпендикулярно сторонам шестигугольника поперечного сечения).

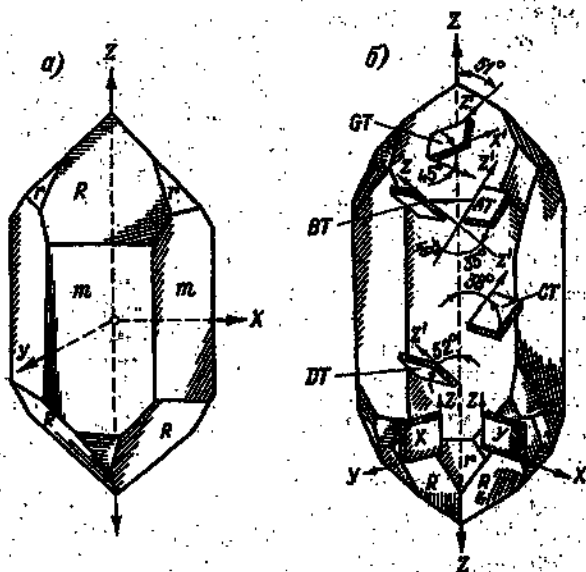


Рис. 6.4. Кристалл кварца.

Кристалл кварца анизотропен и его свойства в направлении различных осей неодинаковы, поэтому и свойства кварцевых пластин зависят от угла среза. Выбор среза осуществляется в зависимости от желаемых свойств кварцевого резонатора — его температурных и частотных характеристик. В качестве чувствительных элементов используют срезы с большим температурным коэффициентом частоты (ТКЧ), чаще это простые срезы (рис. 6.4 б) и прежде всего  $Y$ -срез, когда плоскость пластины параллельна оси  $X$ . Частота собственных колебаний кварцевой пластинки связана с ее размерами, плотностью и механическими свойствами кристалла, поэтому ТКЧ связан с температурными зависимостями этих величин.

В диапазоне температур от  $-50$  до  $250^\circ\text{C}$  собственная частота пьезокристалла хорошо описывается полиномом третьего порядка

$$f(T) = f_0(1 + AT + BT^2 + CT^3),$$

где  $f(T)$  — частота при  $T$  °C,  $f_0$  — частота при  $T_0$  °C;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — константы.

Выбрав соответствующий срез кристалла, можно получить значения  $B$  и  $C$ , близкие к нулю, т. е. линейную зависимость выходной частоты от температуры. В распространенных кварцевых термометрах используется  $Y$ -срез, при этом чувствительность термометров, например модели 2801A (США), составляет 0,0001 °C в диапазоне от -80 до 250 °C. Кристаллы чувствительных элементов могут иметь форму, например, плосковыпуклой линзы диаметром 8 мм с радиусом кривизны 100 м и толщиной линзы в центральной части около 0,35 мм. Их размещают, как правило, в металлическом корпусе, подобном корпусу стандартных транзисторов, заполняемом гелием при давлении 0,1—1 атм. Для обеспечения виброустойчивости кристаллы крепят на пружинящих контактах.

Отрицательными характеристиками кварцевых датчиков температуры являются сравнительно большое значение постоянной времени и определенная сложность схем вторичного преобразования. Для создания термометров особенно удобным является использование двух кварцевых генераторов, один из которых с термочувствительным кварцем, а другой — с опорным, термостабилизированным, когда срез кристалла не чувствителен к изменению температуры. Выходная частота с обоих генераторов поступает на смеситель, с которого и снимается разностная частота. В случае, когда частота чувствительного кварца при 0 °C совпадает с частотой опорного, при измерении частоты на выходе смесителя мы получаем в цифровом виде непосредственное значение температуры в градусах Цельсия. Собственная резонансная частота кварцевых датчиков температуры колеблется в пределах от 3 до 30 МГц, а изменение частоты при изменении температуры на 1 °C составляет 100—200 Гц.

Например, в автономных измерителях «Поток» в качестве опорного кварцевого резонатора используется элемент РК-169, а в качестве термочувствительного — элемент РК-112 МА-5000КОД. У такого датчика  $f(T) \approx 1000$  Гц/°C, что позволяет обеспечивать измерение температуры морской воды с погрешностью  $\pm 0,01$  °C с постоянной времени 1 с.

Очевидно, кварцевые термометры следует использовать при необходимости достижения высоких точностных характеристик и разрешающей способности в случае исследования постоянных или медленно меняющихся (частоты менее 0,1 Гц) процессов, например при изучении длиннопериодных флуктуаций температуры, особенно при проведении долговременных автономных наблюдений.

Характеристики наиболее широко используемых термодатчиков приведены в табл. 6.3.

*Неконтактные методы измерения температуры* морской воды основаны на измерении собственного теплового излучения водной поверхности в инфракрасном (ИК) и микроволновом (СВЧ) спектрах. Несмотря на преимущества (измерения могут проводиться практически в любую погоду и в любое время суток), использование СВЧ-диапазона для определения температуры поверхности океана (ТПО) затрудняется относительно низкой излучательной способностью воды

Таблица 6.3

## Характеристики термодатчиков

| Параметр                  | Тип датчика                    |                              |                                  |                                        |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
|                           | термопары                      | ПТС                          | ППТС                             | кварцевый преобразователь              |
| Стабильность              | 0,5—1 °С, дрейф в течение года | 0,1 %, дрейф в течение 5 лет | 0,1—2,5 °С, дрейф в течение года | 0,01 °С, за месяц при температуре 0 °С |
| Чувствительность          | 10—50 мкВ/°С                   | 0,2—10 Ом/°С                 | 100—1000 Ом/°С                   | 1000 Гц/°С                             |
| Воспроизводимость, %      | ±0,75                          | ±0,5                         | ±0,5                             | —                                      |
| Рассеиваемая мощность, Вт | $1,6 \cdot 10^{-7}$            | $0,1—40 \cdot 10^{-8}$       | $0,5—81 \cdot 10^{-1}$           | $10 \cdot 10^{-6}$                     |
| Линейность, %             | 0,1                            | 0,55                         | 5—20                             | << 0,05                                |

в этом диапазоне (0,3—0,4) и существенной зависимостью от состояния поверхности моря (волнение различных масштабов, пена, брызги и т. д.). Анализ имеющихся в настоящее время результатов спутниковых экспериментов показывает, что получение оценок ТПО в этом диапазоне с погрешностью менее 1,5—2 °С в ближайшее время маловероятно. В ИК-диапазоне на измерение ТПО сильное влияние оказывает атмосфера (так, при наличии значительной облачности измерение ТПО практически исключается), что вызывает необходимость его корректного учета или исключения.

Влияние атмосферы проявляется в молекулярном и аэрозольном рассеянии ИК-излучения облачностью, его селективном и неселективном поглощении в основном атмосферным водяным паром, углекислым газом и озоном, а также в поглощении ИК-излучения кристаллами льда, располагающимися вблизи тропопавзы. Если влияние облачности в ИК-диапазоне избежать практически невозможно (результаты измерений ТПО при наличии облачности должны каким-либо образом выделяться из общего массива данных), то рассеяние водяным паром,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  и поглощение кристаллами льда можно в значительной мере уменьшить. Для этого, во-первых, измерения в ИК-диапазоне проводят в так называемых окнах прозрачности атмосферы, характеризующихся почти полным пропусканием излучения, а во-вторых, используют многоканальные ИК-радиометры, обладающие современными техническими характеристиками. Кроме того, для оценки ТПО можно воспользоваться методами, в которых осуществляются эмпирические связи температуры воды с рядом измеряемых величин. Это можно реализовать путем прямых одновременных подспутниковых измерений гидрометеорологических параметров с последующей статистической обработкой результатов наблюдений с помощью регрессионного, корреляционного анализа и т. п. Подобные методы дают погрешности оценки ТПО в пределах 0,5—1,0 °С. Еще более высокую точность измерения ТПО можно достигнуть, если применять ИК-радиометры на самолетах, летающих на небольших высотах.

Анализ положительных и отрицательных сторон существующих дистанционных методов измерений ТПО позволяет сделать вывод,

что наиболее целесообразно проводить комплексные измерения температуры воды с использованием как подспутниковых прямых измерений, так и ИК- и СВЧ-методов. В этом случае данные прямых подспутниковых измерений используются как калибровочная база для ИК-измерений, проводимых в условиях безоблачной атмосферы. Результаты этих измерений (точность которых принципиально достигает более высоких значений, чем при СВЧ-радиометрических измерениях) будут уже калибровочной основой для всепогодного метода определения ТПО — метода СВЧ-радиометрии. Можно надеяться, что реализация такого подхода позволит повысить точность определения температуры поверхности океана.

Таким образом, существует большое число различных методов измерения температуры морской воды. По принципу и месту проведения измерений все измерители температуры можно подразделить на глубоководные измерители, измерители температуры поверхности моря (ТПМ) и измерители температуры поверхностного слоя моря (ТПСМ).

Под температурой поверхностного слоя понимается температура верхнего слоя морской воды толщиной не более 1 м в месте измерения, принимаемая за среднюю в этом слое и условно распространяемая на ближайшую акваторию. Температуру поверхностного слоя следует отличать от температуры поверхности моря (океана), под которой понимается температура тонкого поверхностного слоя морской воды толщиной от нескольких микро до 1—2 см. Температура поверхности моря может отличаться от температуры поверхностного слоя на 1—3 °C. Вследствие испарения она обычно ниже температуры поверхностного слоя.

### 6.3. Измерители температуры морской воды

В настоящее время в океанологической практике для измерения ТПМ (ТПО) используются в основном лишь неконтактные методы (ИК- и СВЧ-радиометры). Так как наибольшее применение нашли ИК-радиометры, остановимся более подробно на их принципе действия. ИК-радиометры используют естественное (тепловое) излучение водной поверхности.

Фундаментальной основой при рассмотрении теплового излучения является понятие об абсолютно черном теле (АЧТ) — теле, поглощающем все падающее на него излучение любых длин волн. Спектральное распределение излучения АЧТ описывается законом Планка

$$W_{\lambda} = 2\pi hc^2 / (\lambda^5 e^{hc/(\lambda T)} - 1) = c_1 / (\lambda^5 e^{c_2/(\lambda T)} - 1), \quad (6.6)$$

где  $W_{\lambda}$  — спектральная плотность излучения, Вт/(см<sup>2</sup> · мкм);  $\lambda$  — длина волны, мкм;  $h$  — постоянная Планка:

$$h = (6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34} \text{ Вт} \cdot \text{с}^2;$$

$T$  — абсолютная температура, К;  $c$  — скорость света:

$$c = (2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10} \text{ см/с};$$

$c_1 = 2\pi h c^2 = (3,7415 \pm 0,00019) \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ ;  $h$  — постоянная Больцмана:

$$h = (1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-23} \text{ Вт} \cdot \text{с/К}.$$

Анализ выражения (6.6) позволяет сделать вывод, что лучистый поток, излучаемый АЧТ, быстро возрастает с ростом температуры. Выражение этого возрастания можно получить, проинтегрировав уравнение Планка:

$$W_\lambda = \int_0^\infty d\lambda = [2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^3)] T^4 = \sigma T^4.$$

Это соотношение называется законом Стефана—Больцмана, а  $\sigma = (5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана—Больцмана. Проинтегрировав уравнение Планка, получим закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} T = a,$$

где  $\lambda_{\text{max}}$  — длина волны, на которой наблюдается максимум распределения спектральной плотности излучения при данной температуре;  $a = (2897,8 \pm 0,4) \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Рассчитав с помощью (6.6) излучение АЧТ при температуре от 240 до 300 К, температурах экстремальных состояний океанологических объектов ( $-33 \dots 27^\circ \text{C}$ ), получим, что максимальная плотность излучения будет лежать в пределах длин волн 9,5—12,1 мкм и иметь значения  $1,03 \cdot 10^{-3}$  и  $3,14 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$ . Свыше 99 % плотности излучения приходится на спектральную область 4—40 мкм, а в диапазоне 8—13 мкм сосредоточено 35 % всей плотности излучения.

Формирование теплового излучения моря происходит в тонком поверхностном слое, толщина которого в диапазоне 8—14 мкм составляет около 0,02 мкм. Термический режим этого слоя отличается от режима нижележащих слоев и определяется эффективным ИК-излучением поверхности моря (разность между длинноволновыми излучениями поверхности моря и атмосферы), потерями тепла на испарение, теплообменом с атмосферой и с нижележащими слоями воды (в меньшей степени). Разность ТПМ и воды на глубине около 0,5 м может составлять от десятых долей градуса Цельсия до нескольких градусов Цельсия и может подвергаться суточным колебаниям и по значению и по знаку.

При прохождении ИК-излучения от водной поверхности до приемника измерительного прибора оно подвергается поглощению и рассеянию газами атмосферы, жидкими и твердыми частицами, находящимися во взвешенном состоянии. Основными газами атмосферы, поглощающими ИК-радиацию, являются водяной пар, углекислый газ и озон. При наличии осадков и облачности измерение инфракрасной радиации проводить также невозможно. Поглощение ИК-излучения указанными газами атмосферы является селективным. Имеются участки ИК-диапазона, где спектральный коэффициент пропускания  $T_\lambda$  практически равен нулю и, наоборот, где он близок к единице. Первые из этих участков называются *полосами поглощения*, а вторые, где атмосфера прозрачна для ИК-излучения, — *окнами прозрачности атмосферы*.

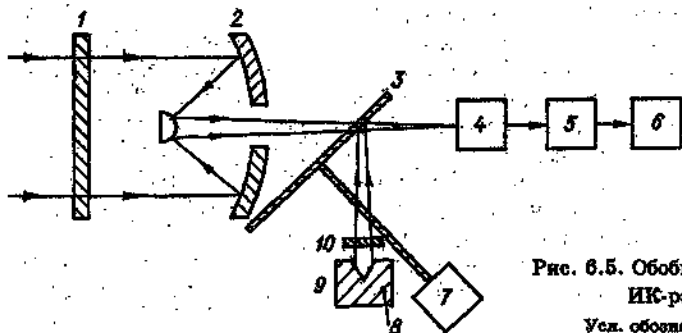
Инфракрасные измерительные приборы регистрируют спектральную плотность излучения и носят название *инфракрасных радиометров*. Принцип получения данных о ТПО по результатам измерения спектральной плотности излучения основывается на использовании законов теплового излучения. Простая и очевидная связь температуры излучающей поверхности и интегральной спектральной плотности  $W_{T_0}$  вытекает из использования законов Стефана—Вольцмана, Ламберта, Кирхгофа

$$W_{T_0} = (\varepsilon \sigma / \pi) T_0^4,$$

где  $\varepsilon$  — интегральная излучательная способность водной поверхности;  $\sigma$  — постоянная излучения;  $T_0$  — термодинамическая температура излучающей поверхности.

Поэтому, измерив  $W_{T_0}$  и зная  $\varepsilon$ , легко вычислить искомую величину  $T_0$ . Как известно, не существует способов непосредственного измерения лучистых потоков. Для их количественного определения применяются преобразователи лучистой энергии в другие виды энергии, чаще всего в электрический сигнал. Этими преобразователями, называемыми приемниками излучения, могут быть термоэлементы, болометры, фотоэлементы. Термоэлементы представляют собою спай различных проводников или полупроводников, болометры — это металлические или полупроводниковые термометры сопротивления с зачерненной поверхностью. Фотоэлементы являются приборами, реализующими фотоэлектрический эффект. Блок-схема ИК-радиометра, типичная для большинства систем подобного рода, приведена на рис. 6.5.

Радиационный поток от водной поверхности попадает в ИК-радиометр через входное отверстие, закрытое светофильтром (1), прозрачным для ИК-излучения в пределах рабочего интервала длин волн  $\Delta\lambda$ , и фокусируется зеркальным объективом (2) на приемник излучения (4). Электрический сигнал от приемника излучения, пропорциональный радиационному потоку, подается в блок усиления и преобразования (5), после чего попадает на регистратор (6). Для повышения точности ИК-радиометр снабжается опорным источником для сравнения возникающего сигнала с сигналом от водной поверхности. Для этого используется макет АЧТ (7) в виде, например, полости конической формы, зачерненной внутри. Темпера-



тура макета АЧТ регулируется и измеряется термосопротивлением (8). Излучение от водной поверхности и от опорного источника попеременно с помощью модулятора (3) направляется на приемник излучения (4). В качестве подобного модулятора может использоваться зеркальный диск с прорезями, вращаемый электродвигателем (7). Перед макетом АЧТ на пути потока излучения ставится светофильтр (10), идентичный светофильтру (1).

Существует много конструкций ИК-радиометров, различающихся использованием различных типов приемников излучения, расположением модулятора, типом применяемых объективов (линзовые или зеркальные), размещением макета АЧТ и т. п. Некоторые модификации, использующие в качестве приемников излучения термоэлементы, могут совсем не иметь модуляторов и опорных источников. В этом случае один спай термоэлемента термостатируется. Кроме того, для получения температурного поля поверхности океана могут использоваться сканирующие ИК-радиометры. Они позволяют освещать широкую полосу на водной поверхности по обе стороны от маршрута полета летательного аппарата и получать непосредственно ее тепловые изображения.

Проведенные в США исследования ИК-радиометров, установленных на ИСЗ, показали, что двухканальный ИК-радиометр компенсирует влияние на измерение температуры водяного пара, что исключает необходимость измерения профилей температуры и пара в атмосфере. А при использовании четырехканального ИК-радиометра возможно уменьшение погрешности измерения температуры воды при отсутствии облачности и за счет осуществления коррекции на поглощение ИК-излучения слоем кристаллов льда, расположенных вблизи тропопавзы.

Измерение температуры поверхностного слоя воды (глубина до 1 м) может производиться различными типами измерителей. Не можно измерить обыкновенным ртутным термометром прямо за бортом или в пробе воды, зачерпнутой ведром. Так и поступают с тех пор, как термометр, изобретенный Галилеем в конце XVI в., был снабжен единообразной, сравнимой у разных термометров шкалой, что произошло только после работ Цельсия и Линнея (1740-е годы). И в настоящее время еще пользуются для измерения температуры поверхностным термометром в специальной оправе ОТ-51 (рис. 6.6). Оправа служит для увеличения по-

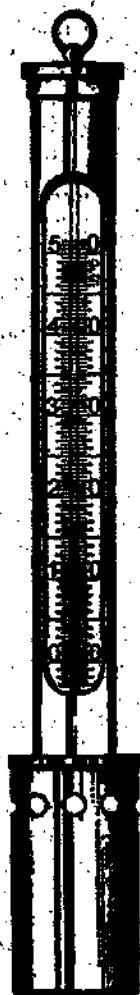


Рис. 6.6. Поверхностный термометр в специальной оправе.



стоянной времени термометра после подъема его на палубу. Для этого нижняя часть оправы выполнена в виде стаканчика, заполняемого водой из точки измерения, что сводит к минимуму искажение результатов из-за изменения окружающей температуры. Кроме того, оправа предохраняет хрупкую конструкцию ртутного термометра от механических повреждений. Термометр данной конструкции может работать в диапазоне  $0-35^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,1$  или  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения пространственного распределения температуры воды в поверхностном и приповерхностном слоях на ходу судна используются различные буксируемые устройства. Простейшим из буксируемых приборов является *термометр сопротивления*, буксируемый на кабель-тросе в поверхностном слое воды. Примером такого типа устройств может служить *буксируемая система ВМС США*. ПИП температуры воды данного устройства в виде платинового ПТС в стальном корпусе с небольшим вертикальным стабилизатором для ориентации по потоку с диапазоном измерений  $-5...30^{\circ}\text{C}$  и погрешностью измерений  $\pm 0,015^{\circ}\text{C}$  смонтирован в кабель-трос. Выдержка системы на рабочем горизонте осуществляется установлением на конце кабель-троса V-образным снарядом фирмы Брайн-тон. Система может буксироваться со скоростью до 12 узлов, а рабочая глубина определяется по длине вытравленного кабеля.

В Морском гидрофизическом институте (АН Украины) был разработан буксируемый измеритель температуры, предназначенный для измерения температуры поверхностного слоя со следующими техническими характеристиками:

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| Диапазон измерения, $^{\circ}\text{C}$ .....    | $-2...35$ |
| Погрешность измерения, $^{\circ}\text{C}$ ..... | $\pm 0,1$ |
| Чувствительность, $^{\circ}\text{C}$ .....      | 0,01      |
| Постоянная времени, с .....                     | 1         |
| Дискретность отсчета, с .....                   | 1         |
| Максимальная глубина погружения, м .....        | 100       |
| Максимальная скорость буксировки, узлы .....    | 15        |
| Продолжительность непрерывной работы, ч .....   | 240       |

Платиновые ПТС со схемой вторичного преобразования помещены в стальном корпусе, снабженном стабилизирующими рудами, и связаны с бортовым блоком одножильным кабель-тросом. Бортовое устройство обеспечивает преобразование получаемой информации в десятичный код, его индикацию в физических единицах ( $^{\circ}\text{C}$ ), осреднение результатов измерения (5, 60, 300, 600 с по выбору оператора), вывод информации на аналоговый регистратор и цифровые каналы регистрации.

Гораздо более сложным и трудным делом оказалось измерение температуры воды на глубинах. Первые попытки использовать для этой цели обычный термометр успеха не имели, так как термометры были не защищены от воздействия гидростатического давления, а также меняли свои показания, проходя через слои воды с различной температурой. В 1782 г. Дж. Сикс сконструировал U-образный максимально-минимальный термометр, которым длительное время

пользовались исследователи моря всего мира. Но и термометр Сикса давал довольно значительные погрешности. Первые действительно надежные измерения температуры воды на глубинах принадлежат Э. Х. Ленцу во время кругосветного плавания на шлюпе «Предприятие» (1823—1826 гг.), когда он использовал обыкновенный толстостенный (1,1 мм) термометр, помещенный в изолирующий и надежно закрывающийся батометр конструкции Ленца и Паррота, стенки которого состояли из 17 слоев различной теплопроводности. В дальнейшем данный способ измерения температуры воды на глубинах получил название *батометрического*.

К XIX в. относится и начало работ по созданию широко используемых и в настоящее время *глубоководных опрокидывающихся термометров*. В 1842 г. Айме предложил минимальный опрокидывающийся термометр с ртутным и спиртовым наполнением, а в 1866 г. Шнайдер сконструировал второй термометр (максимально-минимальный). Наиболее удачной была конструкция ртутного опрокидывающегося термометра с отрывающимся столбиком, предложенная в 1878 г. механиками из Лондона Негретти и Вамбра. Этот термометр регистрировал не только максимальную или минимальную температуру, но и реальную температуру на заданном горизонте. В 1892 г. француз Шабо, а позднее немецкий механик Рихтер поместили во внутреннюю полость защитного стеклянного кожуха опрокидывающегося термометра дополнительный термометр. Этот термометр позволил учитывать изменение длины оторвавшегося столбика ртути основного термометра из-за изменений температуры окружающей среды при подъеме термометра на борт судна, что дало возможность повысить точность измерения температуры воды на любой глубине.

И до сих пор глубоководные опрокидывающиеся термометры используются во всем мире. Они состоят (рис. 6.7) из основного (2) и вспомогательного (5) термометров, заключенных в общую стеклянную оболочку (4), предназначенную для предохранения термометров от внешнего давления.

Основной термометр, служащий для измерения температуры воды на горизонте наблюдений, состоит из резервуара с ртутью (7) и прикрепленного к нему толстостенного капилляра с нанесенной на него шкалой. Пространство между резервуаром и стеклянной оболочкой для увеличения теплопроводности за-

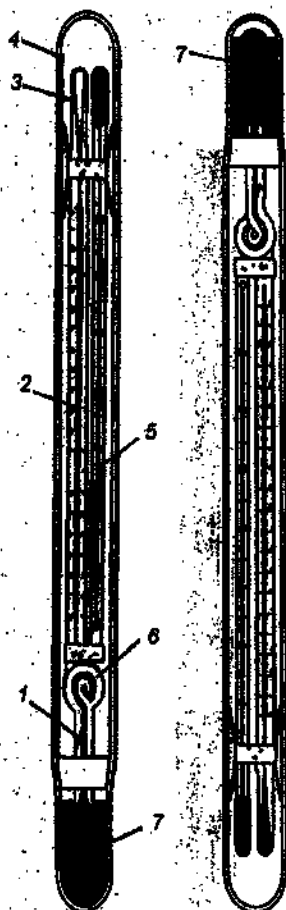


Рис. 6.7. Глубоководный опрокидывающийся термометр.

Усл. обозначения см. текст.

полнено ртутью, отделенной от остальной части термометра пробкой, служащей одновременно и для крепления термометра. Капилляр на некотором расстоянии от резервуара имеет сужение и специальное ответвление (1) (глухой отросток), предназначенное для обрыва ртути при опрокидывании термометра и фиксации определенного ее объема, соответствующего измеренной температуре. Вслед за отростком капиллярная трубка завернута петлей (6) для приема излишка ртути. С противоположной стороны капилляр заканчивается приемником (3), который при опрокидывании термометра заполняется полностью. Объем приемника и капилляра до точки нуля для каждого термометра постоянен, выражается в градусах и обозначается  $V_0$ , или  $Vol$ .

Вспомогательный термометр, вмонтированный в опрокинутом положении относительно основного, служит для измерения температуры внутри стеклянного баллона в момент производства отсчета, что позволяет внести поправку в показания основного термометра на изменение температуры окружающей среды (редукционная поправка).

Глубоководные термометры выпускаются с различными шкалами основного термометра от  $-2...8$  до  $-2...32$  °C, с ценой деления от 0,05 до 0,1 °C и с погрешностью измерений от  $\pm 0,05$  до  $\pm 0,1$  °C. Вспомогательные термометры имеют шкалы с пределами  $-20...45$  °C и с делениями шкалы через 0,5 °C.

В 1914 г. И. Б. Шпиндлер описал возможность их использования для определения глубины погружения приборов в море. Если в глубоководном опрокидывающемся термометре разгерметизировать наружный стеклянный кожух в его нижней части со стороны резервуара основного термометра, то в таком незащищенном от давления термометре длина столбика ртути в капилляре будет изменяться не только под влиянием температуры, но и в результате меняющегося гидростатического давления. Такое устройство получило название *термометр-глубомер ТГМ* (рис. 6.8). В конструкции ТГМ предусмотрено отверстие в его верхней части для стока воды, а резервуар его основного термометра отогнут и располагается вдоль капилляра для уменьшения общей длины глубомера. Одновременно с ТГМ на ту же глубину опускается обычный глубоководный термометр.

Отсчет по глубоководному термометру дает истинную температуру воды на данном горизонте, а отсчет по ТГМ искажен влиянием давления, поэтому значение последнего может быть рассчитано по разности показаний обоих термометров.

На регулярной выставке океанологической техники в Брайтоне в 1994 г. фирма «SIS-Sensoren Instrumente Systeme» (Германия) представила глубоководные опро-



Рис. 6.8. Термометр-глубомер ТГМ.

кидывающиеся термометры RPV 4002 (стоимостью 3200 нем. марок) и глубометры RPM 2000, 6000, 10000 (3500 нем. марок). Это не привычные стеклянные ртутные термометры, а миниатюрные электронные измерители, выполненные в стандартных габаритах для крепления их в обычной двухпенальной раме батометра. Показания датчика высвечиваются на пятиразрядном LCD-табло, аналогичному применяемому в наручных часах. Двух литиевых элементов питания от обычных наручных часов хватает на 2700 измерений. Высокая временная стабильность (уход составляет  $0,00025^{\circ}\text{C}$  в месяц) позволяет с помощью этих устройств проводить метрологическую поверку СТД-систем даже непосредственно в экспедициях.

В настоящее время в практике океанологических исследований широко используются различного типа термобатиграфы, позволяющие получать оперативную информацию о распределении температуры воды по глубине в дрейфе или на ходу судна. Существуют механические и электронные термобатизонды. Правда, следует отметить, что механические термобатиграфы обладают значительными погрешностями, малым разрешением и несовершенной формой регистрации. Современные автоматизированные электротермобатизонды позволяют получать информацию в виде, удобном для ввода в ЭВМ. Связь бортового блока с зондирующим устройством осуществляется по многожильному или одножильному кабель-тросу, гидроакустическому каналу или радиоканалу. Существуют также полностью автономные зонды, снабженные внутренним регистратором. Рассмотрим более подробно некоторые наиболее широко используемые термобатизонды. Технические характеристики более широкого круга подобных систем приведены в табл. 6.4.

К механическим термобатизондам относится устройство типа батитермограф, различные модификации которого выпускаются во многих странах (Великобритания, Германия, Дания, США, Япония и другие). Все они в какой-то мере отличаются глубиной погружения, но конструкция их практически одинакова. Наша промышленность выпускает два типа подобных приборов: ГМ-7-III и ГМ-9-III. Кроме того, если ГМ-9-III предназначен для измерения распределения температуры воды по глубине в слое 0—200 м, то ГМ-7-III позволяет еще и отобрать пробы воды на восьми горизонтах в этом слое.

*Батитермограф ГМ-9-III* (рис. 6.9) состоит из термоблока, регистрирующего устройства и батиблока, соединенных вместе с помощью корпуса прибора (соединительной гильзы). Термоблок предназначен для регистрации температуры, а батиблок показывает глубину. Движение этих двух блоков комбинируется в одно движение пера, записывающего на пластинке из стекла со специальным покрытием изменение температуры в зависимости от глубины. Таким образом получают температурную кривую от поверхности до глубины 200 м. Прибор предназначен для зондирования верхнего слоя океана с судна, лежащего в дрейфе, стоящего на якоре или на ходу судна.

Термоблок (рис. 6.9 а) представляет собой термосистему, состоящую из медной капиллярной трубки, соединенной с концом термо-

Таблица 6.4

## Основные технические характеристики термообзонаторов

| Назначение, тип прибора                                | Измеряемые величины                             | Диапазон измерений                          | Погрешность                                | Чувствительность       | Постоянная времени | Тип НПП                             | Тип защиты                 | Канал связи                         | Глубина погружения, м | Источник питания | Масса прибора, кг | Габариты, мм    |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| СПА                                                    |                                                 |                                             |                                            |                        |                    |                                     |                            |                                     |                       |                  |                   |                 |
| «Москвитин»<br>модель ВУРГ-200                         | Температура, °С;<br>давление, атм               | 0-40<br>0-640                               | $\pm 0,25$ %<br>$\pm 0,5$ %                |                        |                    |                                     |                            | Бумажная лента, ЧМ-сигнал           | 6000                  |                  |                   |                 |
| «Силпикан»<br>модель Т-4 (термометр разового действия) | Температура, °С;<br>давление, атм (два датчика) | -2...30<br>0-45<br>0-76                     | $\pm 0,15$ %<br>$\pm 2$ %<br>$\pm 2$ %     | 0,02                   | 0,10               | Термистор                           | Двухжильный провод         | Аналоговая                          | 450<br>760            | Внутрь           |                   |                 |
| «Биссерман»<br>термометр разового действия             | Температура, °С;<br>давление, атм               | -2...35<br>0-60                             | $\pm 0,2$ %<br>$\pm 2$ %                   | 0,15                   |                    | Термистор                           | ЧМ-сигнал по окисной лампе | Аналоговая набухающая мажущая белая | 600                   | Внутрь           | 1,5               |                 |
| Япония                                                 |                                                 |                                             |                                            |                        |                    |                                     |                            |                                     |                       |                  |                   |                 |
| «Оасага Сейсик»<br>модель ОСК 3259                     | Температура, °С;<br>давление, атм (три типа)    | -2...32<br>1) 0-7<br>2) 0-14<br>3) 0-27     | $\pm 0,2$ %<br>$\pm 0,3$ %<br>$\pm 0,3$ %  |                        |                    | Трубка Бурдона Сильфон              | Перометр на стекле         | Автоматическая запись               | 70<br>140<br>270      |                  | 12,0              | Длина 790, Ø127 |
| модель ОСК 3246                                        | Температура, °С;<br>давление, атм (три типа)    | -2...40<br>1) 0-100<br>2) 0-200<br>3) 0-600 | $\pm 0,05$ %<br>$\pm 0,3$ %<br>$\pm 0,3$ % | 0,01<br>0,1 %<br>0,1 % | 0,10               | Пластиковый термометр морозостойкий | Цифровая печать            | То же                               | 1000<br>2000<br>6000  |                  | 11,0              |                 |

|                                                           |                                              |                             |                 |                           |                                                    |                      |             |               |            |                    |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------------------------------------|----------------------|-------------|---------------|------------|--------------------|
| модель ОСК ВЗВ                                            | Температура, °C;<br>давление, атм (два типа) | 2—30<br>1) 0—183<br>2) 0—46 | ±0,1—±0,15      | Термистор                 | ЧМ-опт. на основе окисл. нап. на бу-ночку на-денте | Аналогичный          | 1830<br>460 | Борт-сеть     | 1,8<br>1,3 | Ø70×488<br>Ø71×355 |
| «Циркус Сибирь»<br>цифровой термобатиграф «Морской конек» | Температура, °C;<br>давление, атм            | 0—35<br>0—63,5              | ±0,2<br>±2,5 м  | Магнитная панель          | Магнитная панель                                   | Автономный           | 635         | Набор батарей | 9,0        | Длина 610, Ø160    |
| «Мет-Океан»<br>модель МОХ-БТ 20                           | Температура, °C;<br>давление, атм            | -2...38<br>0—100            | ±0,05<br>±0,3 % | Магнитная панель          | Магнитная панель                                   | То же                | 1000        | Набор батарей |            | Длина 498, Ø10     |
| Великобритания                                            |                                              |                             |                 |                           |                                                    |                      |             |               |            |                    |
| Модель БТ-5                                               | Температура, °C;<br>давление, атм            | -5...49<br>0—30             | ±0,05           | Термистор                 | Аналоговый кабель                                  | Стрелочный индикатор | 800         |               | 0,3        | Длина 100, Ø26     |
| Германия                                                  |                                              |                             |                 |                           |                                                    |                      |             |               |            |                    |
| «Гидро-Висс»<br>батигермограф                             | Температура, °C;<br>давление, атм            | -1...30<br>0—2,75           | ±0,2<br>±2,75   | Трубка Вурдона<br>Сильфон | Переход на стекло                                  | Автономный           | 245         |               |            | Длина 710, Ø160    |

а)



б)



Рис. 6.9. Ватитермограф ГМ-9-III.

метрической геликоидальной полый пружины. Вся система заполняется толуолом. Капиллярная трубка длиной 20—25 м и наружным диаметром 1,2 мм уложена в несколько слоев на гребенках, радиально расположенных в хвостовой части прибора. Термосистема защищается от механических повреждений ребрами стабилизатора. Геликоидальная пружина представляет собой трубку из бериллиевой бронзы, свернутую в виде спирали с тремя витками. Один конец пружины, связанный с капиллярной трубкой, закреплен неподвижно, ко второму — свободному — концу припаяна стрелка с иглой на конце. При колебаниях температуры изменяется и объем толуола, которым заполнена термосистема. Возникающая при этом упругая деформация геликоидальной пружины приводит к перемещению иглы, которая, скользя по покрытию стекла, процарапывает его рабочую поверхность, покрытую чернильным раствором. В термоблоке установлена также и фиксирующая стрелка, предназначенная для вычерчивания базисной линии. Эта линия служит для проверки правильности установки стекла в отсчетном приспособлении.

Батиблок (рис. 6.9 б) служит для записи глубины погружения прибора. Он состоит из цилиндрической пружины, надетой на неподвижный стержень. Поверх пружины укреплен блок, состоящий из трех спаянных между собой сильфонов. Пружины и сильфоны воспринимают меняющееся давление воды при изменении глубины погружения прибора. Неподвижный конец сильфонов припаян к стакану головки, подвижный конец закрыт втулкой, к которой с помощью направляющего угольника прикреплен столик с устанавливаемым на нем стеклом для записи вертикального профиля температуры. При погружении прибора втулка под воздействием гидростатического давления перемещается по стержню на расстояние, пропорциональное гидростатическому давлению, а вместе с ней перемещается и стекло. Стрелка, которой заканчивается геликоидальная пружина, вычерчивает кривую линию, соответствующую изменению температуры с глубиной.

Для отсчета и обработки записи батитермографа используется специальное отсчетное приспособление. Основной его частью является тарировочная сетка, горизонтальные линии которой соответствуют

глубинам, а вертикальные — температурам. Сетка жестко установлена в рамке с пазами. Над рамкой в конической оправе укреплен дупа.

### Основные технические характеристики ГМ-9-III

|                                                   |         |
|---------------------------------------------------|---------|
| Диапазон измерения температуры, °С .....          | -2...30 |
| Погрешность измерения температуры, °С .....       | ±0,1    |
| Диапазон измерения глубины, м .....               | до 200  |
| Погрешность измерения:                            |         |
| глубины до 30 м, м .....                          | ±1      |
| глубины свыше 30 м, % от измеренной глубины ..... | ±8      |
| Масса прибора в воздухе, кг .....                 | 10      |
| Габаритные размеры, мм .....                      | 120×640 |

Уже длительное время благодаря простоте изготовления и эксплуатации, которая зачастую по силам даже экипажам коммерческих судов, в океанографической практике для исследования верхнего слоя океана широко используются теряемые батитермографы (ХВТ), выпускаемые многими фирмами.

Впервые термальный зонд был выпущен американской корпорацией «Сиппикан» в 1960 г., и с тех пор появилось множество типов судовых и авиационных систем, позволяющих определять ход температуры, температуры и электропроводности, температуры и скорости звука с глубиной. Преимуществом использования подобных систем является возможность проведения измерений на ходу судна.

В состав тераемых зондов (рис. 6.10) входят: сами зонды; бортовой блок, состоящий из персонального компьютера со специализированным программным обеспечением; ручное (рис. 6.11) или палубное стационарное метательное устройство (рис. 6.12). Зонды в виде обтекаемого корпуса состоят из измерительного блока, пенала и катушки с сигнальным кабелем. Последний через метательное устройство, в котором устанавливается вторая катушка с кабелем, связывает погружаемый зонд с бортовым блоком. Подобное размещение катушек с сигнальным кабелем позволяет производить измерения точно в заданной точке независимо от скорости и курса носителя. Скорость зондирования в различных моделях может варьировать от 2 до 7 м/с. После достижения определенной глубины кабель обрывается, а зонд теряется.

В настоящее время большое распространение получили теряемые термозонды типа Т-5 и Т-7 «Deep Blue» фирмы «Сипшикан». Зонды Т-5 способны работать до глубины 1000 м при скорости судна до 20 узлов. Зонды Т-7 при той же скорости способны проводить измерения до глубины

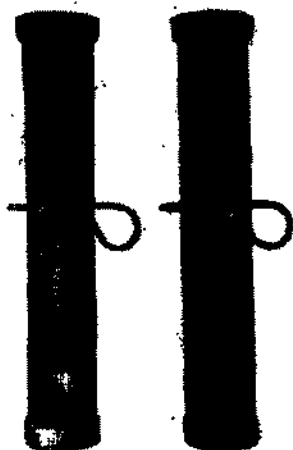


**Рис. 6.10. Теряемый тормозонд (ХВТ).**



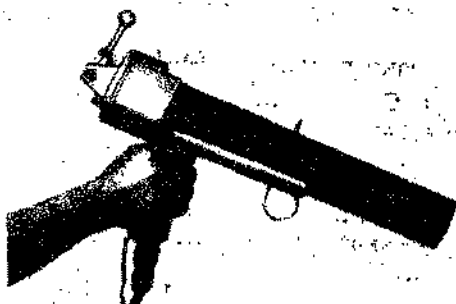


Рис. 6.11. Ручное метательное устройство.



Рис. 6.12. Стационарное метательное устройство.

760 м. Разрешение зондов по глубине 65 см, по температуре 0,01 °C. Постоянная времени датчика температуры (чаще всего термистор) 150 мс. Точность по глубине 2 %, по температуре  $\pm 0,15$  °C.

Среди отечественных приборов имеется измеритель, схожий с зарубежными аналогичными образцами, — термозонд обрывной. В основном он используется при проведении океанографических работ на судах Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны.

Для примера в табл. 6.5 приведены технические характеристики ХВТ-зондов фирмы «Огава Сейки» (Япония) модели OSK 3260.

Таблица 6.5

Характеристика модификаций модели OSK 3260.

| Марка                 | Глубина погружения, м | Максимальная рабочая скорость носителя, узлы | Размеры, мм    | Масса, кг |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------------|----------------|-----------|
| 3260-A                | 460                   | 15—16                                        | Ø70, длина 355 | 1,3       |
| 3260-B                | 460                   | 7                                            | Ø70, длина 355 | 1,3       |
| 3260-C                | 1880                  | 8,5                                          | Ø70, длина 355 | 1,3       |
| 3260-D для вертолетов | 460                   | 8,5                                          | Ø70, длина 355 | 1,3       |

## Глава 7

### МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВОЛНЕНИЕМ

#### 7.1. История наблюдений за волнением

Волнение моря является одной из тех океанографических характеристик, которой человек стал интересоваться сразу же, как только вышел в море. Так как состояние поверхности моря для моряка всегда было связано с силой ветра, то эти две характеристики долгое время оценивались совместно. Все это нашло свое отражение даже в общепринятых выражениях. Так, например, слова «штиль», «бура», «шторм» у каждого человека, связанного с морем, вызывают определенные представления о ветре по соответствующим ему состояниям моря. Подобную ситуацию, как заметил еще В. А. Снежинский (Практическая океанография. — Л.: Гидрометеоиздат, 1951), очень изящно выразил А. С. Пушкин в «Сказке о рыбаке и рыбке» (1838 г.). Здесь Пушкин подбирает не только наиболее краткие и выразительные, но и по самому своему существу верные характеристики состояния поверхности моря, сводя их при этом в пятибалльную шкалу.

|                  |                                                                                                                         |          |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| В первый раз:    | Пошел он к синему морю,<br>Видит, море слегка разыгралось                                                               | 1 балл   |
| Второй раз:      | Помутилось синее море                                                                                                   | 2 балла  |
| Третий раз:      | Не спокойно синее море                                                                                                  | 3 балла  |
| В четвертый раз: | Старичок отправился к морю,<br>Почернело синее море                                                                     | 4 балла  |
| В пятый раз:     | Идет он к синему морю.<br>Видит на море черная буря:<br>Так и вадудись сердитые волны,<br>Так и ходят, так воем и воют. | 5 баллов |

Собранные моряками парусного флота с помощью визуальных или полуйнструментальных измерений многочисленные количественные оценки элементов морских ветровых волн, несмотря на свою приближенность, имеют определенное значение и в настоящее время.

В 1853 г. в Брюсселе состоялась первая Морская международная метеорологическая конференция, много сделавшая для упорядочения гидрометеорологических наблюдений. Многие ее решения сохранили свое значение и до наших дней, например 12-балльная шкала Бофорта для наблюдений за ветром. Десятибалльная шкала оценки состояния поверхности моря появилась в 1858—1859 гг., после чего, претерпев значительные внутренние изменения, она сохранилась до настоящего времени.

Впервые вопрос об единообразии массовых наблюдений за элементами волн серьезно обсуждался на второй Международной конференции в Лондоне в 1874 г. На ней впервые была предложена десятибалльная шкала степени волнения, которая, претерпев незначительные изменения, используется и поныне. К этому времени появлялись первые работы по исследованию влияния волнения на качку, прочность судов и гидротехнические сооружения. Тогда же появились и первые волномерные приборы: вежа Фруда, волномер Пари, динамометры Стивенсона и Гайярда и т. п.

## 7.2. Элементы волнения

Воздействию ветровых волн и зыби подвергаются в первую очередь плавающие в море суда и различные сооружения, находящиеся в прибрежной черте. Кроме того, поверхностное волнение оказывает влияние на формирование квазиоднородного слоя; передачу энергии; интенсивность и глубину перемешивания; интенсивность газообмена океана с атмосферой; проникновение загрязняющих веществ с поверхности моря в глубинные слои; изменение отражательной способности морской поверхности, что особенно сказывается при использовании неконтактных методов исследования океана, и т. п. Кроме того, данные о ветровом волнении и зыби необходимы для многих практических целей (судостроение, гидротехническое строительство на морях, навигация, рыбный промысел, расчет гидрофизических и гидрохимических процессов в океане и т. д.). Размеры, форма волн, скорость их перемещения, т. е. все основные элементы волн, зависят от целого ряда внешних причин: от силы и продолжительности ветра, от формы и размеров исследуемой акватории и т. п. Изучение указанных зависимостей совершенно необходимо для решения основной задачи океанологии в этой области — прогноза и расчета волнения в различных, но конкретных условиях. Решение задачи требует, естественно, законченной теории образования и развития волнения, для чего крайне необходимо проведение непосредственных наблюдений за волнением как в открытом море, так и в прибрежной зоне. Получение достоверных данных невозможно без измерений основных элементов волн. Такими элементами являются:

*высота волны* — превышение вершины волны над соседней подошвой на волновом профиле, проведенном в генеральном направлении распространения волн;

*длина волны* — горизонтальное расстояние между вершинами двух смежных гребней на волновом профиле, проведенном в генеральном направлении распространения волн;

*период волны* — интервал времени между прохождением двух смежных вершин волн через фиксированную вертикаль;

*направление распространения волны* — направление перемещения волны, определяемое за короткий интервал времени порядка периода волны;

**скорость волны** — скорость перемещения гребня волны в направлении ее распространения, определяемая за короткий интервал времени порядка периода волны;

**крутизна волны** — отношение высоты данной волны к ее длине;

**тип волнения** — различают ветровое волнение, зыбь, мертвую зыбь, смешанное волнение. **Ветровые волны (вв)** — вызванные ветром волны, находящиеся под его воздействием. К ним относятся также **гравитационные ветровые волны** (вызванные ветром волны, в формировании которых основную роль играет сила тяжести), **капиллярно-гравитационные ветровые волны** (вызванные ветром волны, в формировании которых принимают участие сила тяжести и сила поверхностного натяжения) и **капиллярные ветровые волны** (вызванные ветром волны, в формировании которых основную роль играет сила поверхностного натяжения). **Зыбь (З)** — вызванные ветром волны, распространяющиеся в области волнообразования после ослабления ветра и (или) изменения его направления, или вызванные ветром волны, пришедшие из области волнообразования в другую область, где дует ветер с другой скоростью и (или) другим направлением. **Мертвая зыбь (МЗ)** — вызванные ветром волны, распространяющиеся при отсутствии ветра. **Смешанное волнение** — волнение, образующееся в результате взаимодействия ветровых волн и зыби;

**форма волнения** — различают регулярное, нерегулярное и толчею. **Регулярное волнение** — волнение, в котором форма и элементы всех волн одинаковы. **Нерегулярное волнение** — волнение, в котором форма и элементы волн меняются от одной волны к другой. **Толчея** — беспорядочное волнение, возникающее вследствие взаимодействия волн, бегущих в разных направлениях;

**степень волнения** определяется в баллах по высоте наиболее заметных крупных ветровых волн, зыби и волн мелководья (прибойных волн), находящихся в поле зрения наблюдателя;

**состояние поверхности моря (с. п. м.)** — элемент поверхностного волнения, выражаемый в баллах, отражает не степень взволнованности моря, а эффект воздействия ветра на морскую поверхность независимо от размеров волн.

Весь комплекс современных наблюдений за волнением обычно выполняют визуально и с помощью различных приспособлений и приборов. Наблюдения за волнением проводятся и с берега, и в открытом море — на судах различного типа и назначения, а также на буйковых станциях и стационарных платформах.

### 7.3. Визуальные наблюдения

Визуальные наблюдения за волнением заключаются в глазомерной оценке следующих элементов волнения: степени, состояния поверхности моря, типа и формы волнения, высоты, периода, направления и скорости распространения волнения.

Степень волнения определяется по высоте наблюдаемых высот волн с округлением до 0,25 м — при высоте волн до 1,5 м; до 0,5 м — при высоте волн от 1,5 до 4 м; до 1 м — при высоте волн более 4 м. Наибольшая высота волн определяется по оценке пяти наиболее заметных крупных волн, прошедших перед глазом наблюдателя в течение 5 мин. Высота волн определяется на глаз, по последовательным отметкам гребня и подошвы на борту судна или по визуальной проекции гребня на надстройки или мачты судна. Перевод высоты волны в степень волнения производится с помощью шкалы степени волнения (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Шкала степени волнения

| Высота волн, м |      | Балл степени волнения | Словесная характеристика волнения |
|----------------|------|-----------------------|-----------------------------------|
| от             | до   |                       |                                   |
| —              | —    | 0                     | Волнение отсутствует              |
| 0              | 0,25 | I                     | Слабое                            |
| 0,25           | 0,75 | II                    | Умеренное                         |
| 0,75           | 1,25 | III                   | Значительное                      |
| 1,25           | 2,0  | IV                    | Значительное                      |
| 2,0            | 3,5  | V                     | Сильное                           |
| 3,5            | 6,0  | VI                    | Сильное                           |
| 6,0            | 8,5  | VII                   | Очень сильное                     |
| 8,5            | 11,0 | VIII                  | Очень сильное                     |
| >11,0          |      | IX                    | Исключительное                    |

Примечание. Градации «от» и «до» следует понимать так: «от» — включительно, «до» — исключительно.

Состояние поверхности моря (с. п. м.) определяется в баллах по специальной шкале, а критерием для его оценки является вид поверхности моря под действием на нее ветра (табл. 7.2). При этом необходимо обращать внимание на внешние признаки: вид гребней, появление и распределение по водной поверхности «барашков», брызг и пены. По с. п. м. можно судить о силе ветра.

Определение состояния поверхности моря производится только при ветре. При штиле с. п. м. всегда равно нулю. При мертвой зыби с. п. м. не определяется.

Тип волнения обычно определяют по следующим признакам.

Ветровое волнение — подветренный склон волн более крутой, чем наветренный. Верхушки гребней волн обычно заваливаются, образуют пену, или даже срываются сильным ветром. Направления ветровых волн и ветра приблизительно совпадают.

Зыбь — волны имеют правильную форму, пологи и имеют длинные гребни, направления волн зыби и ветра могут не совпадать.

Мертвая зыбь распространяется при безветрии.

Смешанное волнение наблюдается при одновременном присутствии на водной поверхности ветрового волнения и зыби, причем направление распространения этих типов волн может не совпадать. Этот тип волнения чаще всего встречается в открытом море. Запись в книжке наблюдений производится в виде дроби, например, вв/з, причем в числителе ставится преобладающий тип.

Шкала состояния поверхности моря

| Характеристика состояния поверхности моря, баллы | Признаки для определения состояния поверхности моря                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0                                                | Зеркально-гладкая поверхность                                                                                                                                             |
| 1                                                | Рябь, появляются небольшие гребни волн                                                                                                                                    |
| 2                                                | Небольшие гребни волн начинают опрокидываться, но пена не белая, а стекловидная                                                                                           |
| 3                                                | Хорошо заметны небольшие волны, гребни некоторых из них опрокидываются, образуя местами белую клубящуюся пену — «барашки»                                                 |
| 4                                                | Волны принимают хорошо выраженную форму, повсюду образуются «барашки»                                                                                                     |
| 5                                                | Появляются гребни большой высоты, их пенящиеся вершины занимают большие площади, ветер начинает срывать пену с гребней волн                                               |
| 6                                                | Гребни очерчивают длинные валы ветровых волн, пена, срываемая с гребней ветром, начинает вытягиваться полосами по склонам волн                                            |
| 7                                                | Длинные полосы пены, срываемой ветром, покрывают склоны волн и местами, огибаясь, достигают подошвы                                                                       |
| 8                                                | Пена широкими, плотными сливающимися полосами покрывает склоны волн, отчего поверхность становится белой, только местами во впадинах волн видны свободные от пены участки |
| 9                                                | Вся поверхность покрыта плотным слоем пены, воздух наполнен водяной пылью и брызгами, видимость значительно уменьшена                                                     |

**Форма волнения** определяется по расположению на поверхности моря гребней и впадин волн. Волны зыби и хорошо развитые ветровые волны при большой степени волнения являются примером регулярного волнения, когда на водной поверхности хорошо заметны сравнительно длинные гребни, следующие в виде параллельных валов друг за другом. При нерегулярном волнении гребни волн разорваны на отдельные части неодинаковой высоты и длины по фронту движения, расстояние между соседними гребнями волн больше, чем длина этих гребней по фронту движения.

**Направление распространения волн** может быть определено путем непосредственного пеленгования по судовому компасу и фиксируется по восьми румбам: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ. При этом следует отметить, что на поверхности воды чайки, как правило, сидят носом на волну. Кроме того, необходимо учитывать, что направление указывается в соответствии с тем, откуда идут волны. Если наблюдается смешанное волнение, то направление определяется для каждого типа, а запись производится в виде дробей.

**Длина волны** определяется путем сравнения с длиной судна. При длине волны больше длины судна с кормы вытравливается буй на такое расстояние, чтобы он находился на гребне волны, когда второй гребень находится под наблюдателем.

**Период волнения** определяется путем засечки секундомером времени прохождения через определенную, четко зафиксированную на поверхности моря, точку одиннадцати последовательно следующих друг за другом гребней волн. Затем это полученное время делят на десять и получают период волнения.

## 7.4. Устройства и приспособления для определения элементов волн

Для измерения элементов отдельных волн используют различного типа специальные измерительные приспособления. Несмотря на кажущуюся примитивность, при тщательном выполнении измерений они дают отличные результаты. Одними из первых подобных приспособлений, не потерявших своего значения и до настоящего времени, являются волномерные рейки и вехи или волномерные плиты с сеткой, которые предназначены для определения высоты волн и повышают точность визуальных наблюдений.

**Волномерные рейки** (рис. 7.1 а) используются на небольших глубинах и обычно представляют собой пест круглого сечения для наименьшего сопротивления ударам волн с яркими делениями через 10 см. Длина реек выбирается с расчетом возможности измерения наиболее крупной волны при наивысшем уровне. Рейки или забиваются непосредственно в дно, или крепятся к свае.

**Волномерные вехи** (рис. 7.1 б) используются в более глубоких местах, где нельзя ставить рейку. Они состоят из рейки, на которую нанесены деления, с поплавком и жестко закрепляются на одном и даже на трех якорях. При наблюдениях в открытом море можно использовать плавучие волномерные вехи. Стабилизация их в вертикальном положении достигается с помощью груза, укрепленного на нижнем конце рейки. Ниже груза закреплена специальная демпфирующая площадка, представляющая собой горизонтально расположенную раму, обтянутую водонепроницаемым брезентом. Площадка опускается на глубину, где не сказывается влияние поверхностного волнения (обычно более двухкратной высоты волны). Вежа опускается с борта судна и удерживается на лине на нужном расстоянии.

В целом подобные наблюдения не позволяют зафиксировать непрерывный процесс колебаний взволнованной поверхности и результаты таких наблюдений нельзя использовать для исследования статистических и спектральных характеристик волнения. Одним из наиболее точных методов регистрации колебаний в точке является видео- или

киносъемка волномерной вежи или рейки с делениями. Однако этот метод трудоемок и используется, как правило, в качестве эталона при оценке точности других способов измерения характеристик поверхностного волнения.

В океанологической практике прибрежных наблюдений за основными элементами поверхностных волн, а также для измерения расстояний на море используются оптические *волномеры-перспектометры*. Широкое распространение у нас в стране нашел береговой волномер-перспектометр ГМ-12 (ВВ-49) конструкции Иванова (рис. 7.2). Опти-

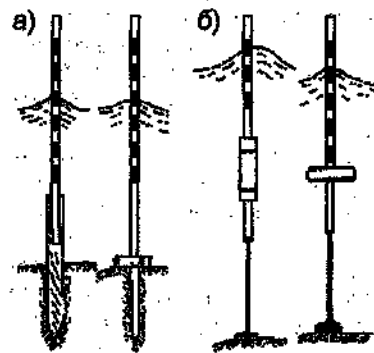


Рис. 7.1. Волномерные рейки (а) и вежи (б).

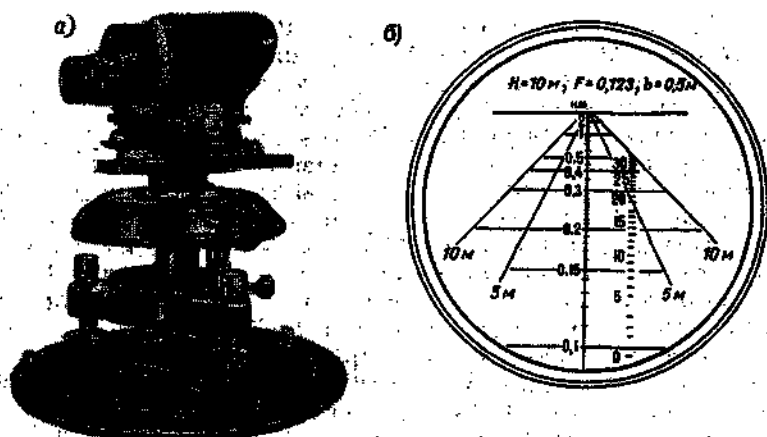


Рис. 7.2. Волномер-перископтр Иванова (ГМ-12).

а) волномер; б) перспективно-измерительная сетка.

ческая схема прибора представляет собой монокуляр (в некоторых модификациях бинокуляр) со встроенной специально разграфленной сеткой, состоящей из системы линий в перспективной проекции.

На помещенную в фокальной плоскости одного из монокуляров стеклянную отсчетную сетку нанесены штрихи шкалы дальности, высоты волн и наклонные линии для определения горизонтальных линий, перпендикулярных лучу зрения. Если верхнюю горизонтальную линию совместить с линией горизонта, то остальные горизонтальные линии будут соответствовать шкале дальности, оцифрованной в единицах длины. Наклонные линии, сходящиеся в одной точке, соответствуют параллельным линиям на поверхности моря, проведенным, как правило, на расстоянии 5 м одна от другой. Оптическая головка крепится на площадке, опирающейся обычно на горизонтальный цилиндрический валик, способный перемещаться в вертикальной плоскости для совмещения линии видимого горизонта на отсчетной сетке с линией видимого горизонта на море. Кроме того, вся эта конструкция может вращаться в горизонтальной плоскости относительно лимба на  $360^\circ$  и крепится в нужном положении стопорными винтами.

Отсчетная, или перспективная, сетка имеет две шкалы: шкалу дальности, расположенную в середине поля зрения оптической головки по вертикали, оцифрованную в единицах длины и предназначенную для измерения расстояний на море, и шкалу высоты волн, расположенную справа от шкалы дальности и предназначенную для измерения высоты волн, которая определяется по числу делений, уложившихся между подошвой и гребнем волны.

Сетка прибора рассчитывается для определенной высоты расположения прибора над поверхностью моря. В противном случае все результаты измерений умножаются на переходной коэффициент

$$k = H_1/H,$$



где  $H_1$  — фактическая высота установки прибора;  $H$  — рассчитанная высота. Рекомендуется выбирать  $k$  в пределах 0,5—2.

Инструментальные измерения элементов морских волн выполняются с помощью специальной водоизмерительной аппаратуры, которая позволяет регистрировать величины, характеризующие волновые движения, или измерять их элементы. Для статистической обработки при измерении волн необходима регистрация совокупности не менее 150—200 волн, следующих одна за другой. Поэтому длительность измерений волнения в точке при среднем значении периода волн от 4 до 8 с должна быть не менее 15—20 мин. Причем необходимо учитывать, что при развитии и затухании штормового волнения измерения следует производить с дискретностью 1—3 ч.

Как известно, частота и высота морских ветровых волн находятся в пределах примерно от 0,03 до 10 Гц и от нескольких миллиметров до 25 м. И вполне естественно, что измерять волны в таких широких пределах изменений частот и высот одним каким-либо универсальным прибором практически невозможно. Но для решения основных практических и научных задач достаточно измерение волн с высотами 0,1—25 м и частотами 0,03—1,0 Гц в открытых частях океанов и морей и с высотами 0,1—10 м и частотами 0,06—1,0 Гц в прибрежных районах. Для таких характеристик волнения возможно использование и какого-то одного универсального прибора.

В настоящее время существует большое число разнообразных методов и приборов — волномеров (приборы или устройства для измерения элементов волн) или волнографов (приборы для записи волновых колебаний свободной поверхности моря) для исследования морского волнения. Рассмотрим принцип действия и устройство некоторых типов водоизмерительной аппаратуры, используемой в океанографической практике.

### Электрозные волнографы

Электрозные волнографы включают в себя приборы, датчиками которых являются один или два электрода, погруженных вертикально в воду. По принципу действия можно различить следующие типы электрозных волнографов.

*Струнные (резистивные) волнографы* предназначены для непрерывной записи профиля волн в выбранном масштабе. Датчиком таких волнографов является не окисляемая в морской воде проволока с большим удельным сопротивлением, натянутая обычно на жесткую опору (рис. 7.3), устанавливаемую в прибрежных районах. Проволока заглубляется в воду примерно на половину своей длины. Морская вода служит проводником с малым активным сопротивлением. Пусть

$$\gamma/(\epsilon \omega) \gg 1,$$

где  $\gamma = 4 \cdot 10^{-2} \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{см})$  — удельная проводимость морской воды;  $\epsilon = 7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см}$  — относительная диэлектрическая проницаемость морской воды;  $\omega$  — угловая частота переменного тока питания, рад/с.

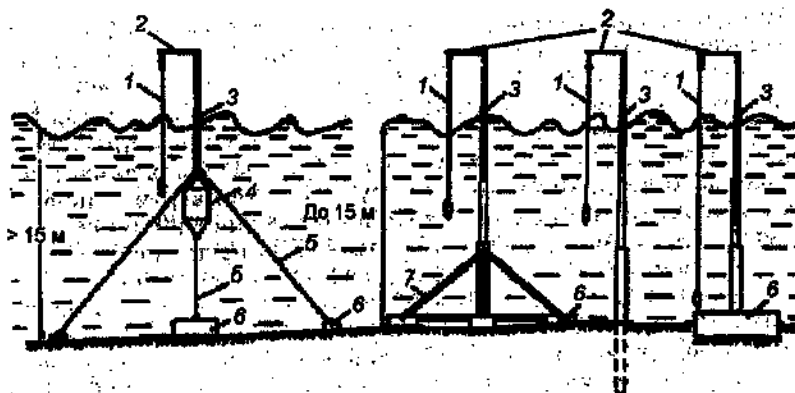


Рис. 7.3. Струнные (резистивные) волнографы.

а — на притопленном буйе с гальванорезными оттяжками; б — на сварной пирамиде; в — на свае, забитой в грунт; г — на свае, заделанной в бетонную плиту.

1 — датчик с грузом; 2 — кронштейн; 3 — телескопическая опора; 4 — притопленный буй; 5 — трос; 6 — мертвый якорь; 7 — сварная рама.

Экспериментально доказано, что для питания струнного датчика оптимальная частота тока  $f$  может колебаться в пределах 5—8 кГц, так как использование тока высокой частоты способствует устранению обрастания электродов. Поэтому, зная, что  $\omega = 2\pi f$ , и выбрав  $f = 5$  кГц, получим  $\omega = 31\,400$  рад/с. Отсюда

$$\gamma/(\epsilon\omega) = 1,82 \cdot 10^5 \gg 1,$$

т. е. можно сказать, что в данном случае морская вода для токов звуковой частоты практически представляет собой короткозамкнутый провод (изменение расстояния между двумя нихромовыми проволоками в морской воде от 0 до 25 м изменяет сопротивление между ними не более чем на 0,5 Ом). Таким образом, при волнении закорачивается часть проволоки, соответствующая уровню воды, а изменение ее сопротивления пропорционально профилю проходящей волны.

Типичным прибором такого типа является разработанный у нас в стране *прибрежный волнограф ГМ-61*, предназначенный для измерения высот (в диапазоне 0,05—10 м) и периодов волн. Прибор состоит из проволочного датчика кабельной связи, генератора звуковой частоты для питания датчика (5 кГц), измерительной схемы и аналогового регистратора с возможностью вывода на ЭВМ. В качестве датчика, преобразующего волновые колебания в электрический сигнал, используется высокоомная безокисная нихромовая проволока диаметром 0,3—0,4 мм и длиной 10 м, которая с концевым грузом подвешивается на вестаках, свайных пирсах, свайных основаниях и т. д. и погружается при этом в воду на половину своей длины. Датчик включен в измерительную схему, выходной сигнал которой, промодулированный с профилем волновых колебаний водной поверхности, по линии связи (провод П-268 длиной около 500 м) подается на выпрямитель, а затем на регистратор.

Интересная реализация использования струнных волнографов для исследования высокочастотной составляющей поверхностного волнения была осуществлена в США. Датчик измерительной системы состоит из нескольких струн, изготовленных из нержавеющей стали диаметром 0,38 мм, длиной около 9 м и скомпонованных по группам. Каждая группа состоит из трех штук, расположенных по прямой на расстоянии 15 см друг от друга. Причем вертикальная плоскость расположения каждой из групп составляет  $90^\circ$  по отношению к другим группам. Подобное расположение групп позволяет измерять не только амплитуду и период волнения в диапазоне частот 0—10 Гц, но и наклон волны с точностью до  $2^\circ$  и направление распространения волны. Следует отметить, что для успешной эксплуатации такого прибора необходимы специальные схемные решения, тщательный расчет измерительной цепи и трудоемкая калибровка.

Электроконтактные волнографы являются частным случаем резистивных волнографов. Они представляют собой вертикальный ряд пар контактов, расположенных через фиксированное (5—10 см) расстояние на несущем стержне (рейке). Между контактами рейки включены постоянные сопротивления. При изменении уровня воды контакты либо замыкаются, либо размыкаются, изменяя общее сопротивление цепи. Зная положение контактов относительно уровня поверхности, можно определить ее возвышение. При уменьшении расстояния между контактами данный тип волнографа приближается по своим характеристикам к струнным волнографам, уменьшая дискретность измерений. На точность и стабильность таких волнографов влияют брызги, смазываемость, коррозия, обрастание и загрязнение контактов.

Для устранения подобных причин погрешностей М. Т. Миязаки (Япония) предложил конструкцию волнографа, в котором контакты изолированы от воды. Датчик волнографа начинает работать при сжатии гибкого внешнего кожуха с внутренним токопроводящим слоем под воздействием столба воды переменной высоты таким образом, что внутренние чувствительные элементы замыкаются на общий проводник. Подобная конструкция увеличивает долговечность и надежность волнографа.

К волнографам этого типа относится и выпущенный в США радиоволнограф «Волновая вежа». Датчиком здесь служит длинный изолированный металлический стержень с рядом контактов. Стержень установлен на несущей малоподвижной базе — притопленном, свободно плавающем поплавке. Поплавок состоит из нескольких секций пустотелых загерметизированных труб диаметром 150—200 мм и общей длиной 20 м. Волнограф рассчитан на измерение волн высотой до 4,5 м. Передача получаемой информации осуществляется по радиоканалу, для чего на несущем бье смонтированы измерительная схема, блок вторичного преобразования и радиопередающая аппаратура.

Для измерения средних характеристик волнения, особенно в шельфовой зоне, нашел применение автономный радиоволнограф ГЗ-2 (рис. 7.4) с передачей получаемой информации по радиоканалу. Датчиком волнения в устройстве используется электроконтактная вежа (1).

При работах на глубинах более 20 м в качестве несущей опоры датчика использован буй — вежа Фруда. Такой буй изготовлен из легкого алюминиевого сплава марки АМГ-6 в виде длинной поллой трубы, составленной из набора герметичных секций (2) с соединительными муфтами (3).

Для уменьшения собственных вертикальных колебаний буя на волнении на его нижнем конце прикреплены демпфирующий диск (4) и груз (5). Вся система устанавливается на якорь (6). Полезная грузоподъемность буя при метацентрической высоте 2 м и высоте волн до 6 м составляет 10—15 кг. Общая масса буя не превышает 100 кг.

Определение средних характеристик волнения осуществляется в автономном блоке следующим образом. Измеряется время прохождения 128 волн и суммируются высоты этих волн, затем автоматически это время и сумма делятся на число волн. Таким образом определяют среднюю высоту волн в диапазоне 0,2—8 м с ошибкой 6 % и средний период в диапазоне 0,25—16 с. Автономность работы устройства — до 1 месяца.

Точность и разрешающая способность резистивных и электроконтактных волнографов зависят от стабильности и разрешающей способности источников питания, от точности регистрации напряжения и используемых регистраторов, а также от диаметра датчика.

Емкостные волнографы в простейшем виде представляют собой изолированный, чаще всего тефлоном или углеродосодержащим полнотеленком, токопроводящий стержень с загерметизированным нижним концом, помещенным в морскую воду. Система морская вода — диэлектрик — проводник образует своеобразный конденсатор, емкость которого меняется в зависимости от прохождения профиля волны, т. е. зависит от площади обкладок и прямо пропорциональна профилю волны. Если этому конденсатору сообщен определенный известный заряд  $q$ , то с изменением емкости  $C$  меняется и напряжение

$$U = q/C.$$

Основное требование к емкостным волнографам — линейное изменение выходного сигнала от профиля волны. Датчик волнографа должен иметь небольшой диаметр для уменьшения погрешностей, обусловленных поверхностным натяжением воды, которое вызывает небольшую разность при измерении емкости в случае быстрого прохождения волны, что особенно важно при измерении волн в более высокочастотной части спектра.

Примером подобного типа волнографа является емкостной датчик для регистрации волн, разработанный в США. Датчик волнографа в виде стального стержня диаметром 1,6 мм и длиной 16 см, покрытого полистиролом, позволяет измерять высоту небольших вет-

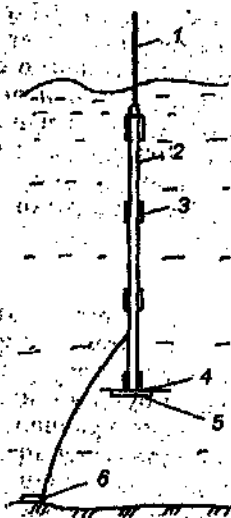


Рис. 7.4. Автономный радиоволнограф ГЗ-2.

Усл. обозначения см. текст.

ровых волн. Погрешность измерения не превышает 6 % для частот 0,03—28 Гц. Широкий динамический диапазон электронной аппаратуры позволяет производить измерение ряби с постоянной точностью независимо от степени волнения. Недостатком датчика является то, что он не может быть установлен на судне, а требует для своей работы неподвижной опоры.

Можно отметить, что электродные волнографы, выполненные наиболее качественно, являются эталонными приборами в волноизмерительной технике.

### Поплавковые волнографы

В качестве датчика для измерения характеристик волнения используются также плавающие поплавки. Поплавки обычно изготавливают в форме вертикального цилиндра и крепят с помощью жестких пружин к несущей конструкции. Переменная архимедова сила, действующая на поплавок при прохождении профиля волны, воспринимается пружинами и преобразуется в непрерывную запись колебаний волнового уровня. Но этот метод не позволяет производить измерения в высокочастотной части спектра.

Примером использования подобного метода может служить волнограф типа Вемельсфельдера с механической передачей перемещений небольшого поплавка, помещенного в перфорированную трубу, при прохождении волнового профиля на регистратор.

### Измерители гидростатического давления

Измерение давления осуществляется датчиками, расположенными на дне при небольших глубинах или находящимися в фиксированном положении ниже поверхности воды. На каждый датчик при этом действуют столб воды и атмосферное давление. Это суммарное давление медленно меняется в связи с наличием в море длиннопериодных колебаний и происходящих атмосферных процессов. Волновой профиль накладывается на эти медленные изменения суммарного давления. Для измерения поверхностного волнения в этом случае используются различного типа датчики гидростатического давления, общие принципы действия которых приведены в главе «Наблюдения за колебаниями уровня моря».

Волнограф модели 521 (рис. 7.5) фирмы «Гидро Продукт» (США) предназначен для измерения высоты и периода волн при температуре окружающей среды 10—50 °C и является абсолютно автономной системой. В его состав входят полупроводниковый тензометрический датчик, преобразователь, самописец с записью результатов измерений на ленте и блок питания. На ленте самописца воспроизводится легко воспринимаемая аналоговая запись средних характеристик высот волн от 0 до 3 м для средних периодов волн 5—20 с. Непрерывная запись амплитуды волны осуществляется в течение 400 с каждые 1000 с. В течение этого промежутка времени определяется средний период волны по среднему времени между двумя момента-

ми пересечения волной нулевого уровня. Точность регистрации по всем измеряемым параметрам составляет  $\pm 2\%$  от всей шкалы, а точность по времени в пределах  $\pm 10\%$ , причем данные о высоте волны автоматически корректируются установкой глубины датчика.

Измерительная схема волнографа помещена в анодированную алюминевую сферу, состоящую из двух разделяемых полусфер с фланцевым соединением. Полусферы кроме анодирования для предотвращения обрастания подвергнуты термообработке и покрыты изнутри и снаружи эпоксидной смолой и краской. Диаметр сферы 278 мм, а толщина стенки 12,7 мм.

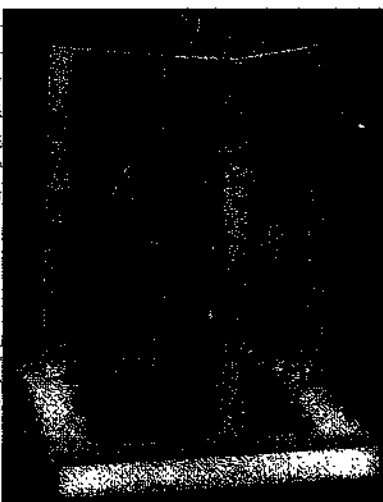


Рис. 7.5. Волнограф модели 521.

В рабочем положении сфера помещается для удобства эксплуатации в стальную поддерживающую раму, снабженную приспособлением для установки сферы в необходимом положении по отношению ко дну. Высота рамы 667 мм, а длина и ширина 508 мм. Автономность работы волнографа 7 суток, а в случае использования внешнего контейнера с дополнительным блоком питания автономность работы увеличивается до 30 суток. В качестве источника питания используются никель-кадмиевые батареи. Волнограф устанавливается на глубину не более 15 м, причем его можно устанавливать на дно или на АБС на больших глубинах.

Более высокая точность измерения характеристик волнения (не хуже  $\pm 1\%$  от всей шкалы) достигнута в аналогичной системе, выпускаемой также фирмой «Гидро Продукт», — дистанционном анализаторе волн модели 621-S.

### Буйковые волнографы

При использовании волнографов подобного типа датчики характеристик поверхностного волнения располагают или на бую, плавающим на поверхности, или подвешивают к нему.

Буи с подвешенным датчиком волнения используются в основном при расположении датчика гидростатического давления на глубине более половины длины волны. Это вызвано тем, что действие ветрового волнения на такую глубину не проникает и гидростатическое давление там постоянно. Оно не зависит от состояния водной поверхности, а датчик давления, подвешенный к бую на такой глубине, воспринимает лишь вертикальные перемещения буя как изменения глубины погружения относительно уровенной поверхности, т. е. как изменения гидростатического давления, пропорциональные профилю волны. Передача сигнала на борт судна может осуществлять-

ся или по кабелю (волнограф ГМ-16, Россия), или по радиоканалу («Метеобуй», США и волнограф ГМ-32, Россия).

Следует отметить, что у нас в стране очень большое число данных о характеристиках волнения, особенно в открытом море, было получено волнографом ГМ-16. На основе этих данных была сформулирована существующая и сейчас теория ветрового волнения. Поэтому, несмотря на наличие определенных погрешностей измерений и снятие с производства, приведем его описание, тем более, что он является типичным представителем буйковых волнографов.

Волнограф ГМ-16 предназначен для записи профиля волны на ленте самописца и определения высоты и периода волн с судна, лежащего в дрейфе или стоящего на якорю. Датчик волнографа на четырехжильном кабеле типа РШМ подвешивается к свободно плавающему на водной поверхности пенопластовому буйку и тем же кабелем длиной 450 м через блок управления и контроля связан с аналоговым регистратором, находящимся на борту судна.

Основной частью датчика (рис. 7.6) является приемник давления (3), представляющий собой латунный цилиндр, одной из боковых плоских стенок которого служит гофрированная мембрана (4) из бериллиевой бронзы, припаянная по контуру к корпусу приемника. Внутри его закреплена текстолитовая пластина с наклеенными на нее четырьмя проволочными тензometрами, изготовленными из константана диаметром 0,03 мм и соединенными между собой по схеме равновесного моста постоянного тока. Пластина стойкой и винтом (5) жестко связана с центром мембраны. Колебания мембраны, вызванные изменением гидростатического давления, через стойку передаются текстолитовой пластине с тензometрами, что вызывает изменение их сопротивлений и разбаланс моста. Напряжение питания (сухие батареи, находящиеся в блоке управления и контроля) по кабелю (1) через штепсельный разъем (2) подается на одну из диагоналей моста, а сигнал разбаланса моста, пропорциональный изменению гидростатического давления, снимается с другой диагонали моста и по кабелю подается на регистратор. В нижней части датчика помещен штуцер (6), на котором смонтирован узел компенсатора (7), состоящий из двух полушфер (оргстекло) и сферического

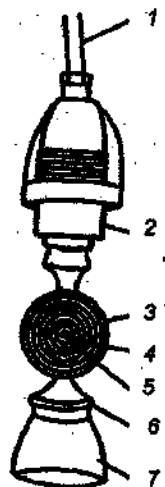


Рис. 7.6. Датчик волнографа ГМ-16.

Усл. обозначения см. текст.

баллона, изготовленного из тонкой эластичной резины. При погружении датчика воздух из баллона компенсатора через штуцер поступает внутрь приемника давления, уравнивая наружное давление на мембрану. Так происходит до достижения рабочей глубины погружения датчика, когда весь воздух компенсатора переходит в приемник давления. В дальнейшем изменение гидростатического давления, вызванное волновыми колебаниями водной поверхности, уже непосредственно воспринимается мембраной.

Недостатком ГМ-16 является то, что при производстве записи волнения судно и буй с датчиком дрейфуют с разными скоростями,

что вызывает необходимость регулярного вытравливания кабеля. Вес вытравленного кабеля, а иногда (особенно при сильном ветре) и нехватка запаса кабеля приводят к тому, что буюк не повторяет свободно волновой профиль, а как бы срезает гребни волн.

От этого недостатка в какой-то мере избавлен *радиоизмеритель волн ГМ-32* и «Метеобуй», принцип действия которых одинаков. В этих устройствах на бую с большим запасом плавучести размещены радиопередатчик с антенной, преобразователем и блоком питания. Датчик гидростатического давления (аналогичный датчику ГМ-16) тензометрического типа с помощью гибкого кабеля подвешивается под буюм на определенной, заранее заданной, глубине. Получаемая информация по радиоканалу передается или на береговую базу, или на борт судна, где она преобразуется в вид, удобный для дальнейшей обработки и регистрации.

При использовании волнографов типа буюв с подвешенным датчиком волнения возникает дополнительная погрешность. Подобная методика измерений предполагает, что система буй — кабель — датчик колеблется под воздействием волн в строго вертикальном положении. На самом же деле из-за воздействия орбитального движения частиц на волне и особенно в результате ударов разрушающихся гребней волн буй совершает также колебания в горизонтальной плоскости (до 15 м). Вследствие гибкости кабеля и довольно большого динамического сопротивления его и датчика горизонтальному перемещению в воде система буй — кабель — датчик не будет сохранять вертикальность, и в измерениях высот волн появляется погрешность, которую иногда называют орбитальной. Эта погрешность может достигать 5—10 % и является случайной в силу случайного характера воздействия волн на буйковые системы.

*Волнографы, регистрирующие ускорение волнового движения*, включают в себя буй с установленными на нем стабилизированными по вертикали датчиками вертикального ускорения (с пределами измерения  $\pm 2g$ ) — акселерометрами. Сигнал с акселерометра после двойного интегрирования по времени позволяет судить о высоте поверхностных волн. Акселерометры устанавливаются на бую, так как предполагается, что движения бую в точности следуют волновым движениям. Надежность работы измерительной схемы этого типа приборов достигается еще и тем, что вся аппаратура помещается внутри бую и изолирована от контакта с внешней средой. Такие бую обладают автономностью работы вплоть до года, автоматически, с заданной дискретностью по времени, передавая сведения о поверхностном волнении. Подобные акселерометрические бую могут быть дрейфующими, теряемыми, привязанными (к судну или несущему бую), закоренными с кабельной или радиосвязью.

В настоящее время существует несколько вариантов подобного типа приборов. Из них можно отметить «Вейврайдер» фирмы «Даттавел» (Нидерланды), «Вейвтрек» фирмы «Эидеко» (США), «Вейвкрейстбуй» фирмы «НВА Контроль ЛТД» (Великобритания) и автономный волноизмерительный буй ГОИНа (Россия). Эти волнографы позволяют измерять параметры ветрового волнения с достаточно вы-



сокой точностью даже в штормовых условиях. Однако их конструкция довольно сложна и имеет высокую стоимость.

**Волномерный буй «Вейрайдер»** имеет полый стальной сферический корпус диаметром 70 см и массой 90 кг. Внутри буя в специальной полости, заполненной демпфирующей жидкостью, установлен высокочувствительный акселерометр на демпфированном маятнике для стабилизации его вертикального положения. Период собственных колебаний маятника составляет 40 с. В бую размещены также схема преобразования сигнала датчика, блок питания и УКВ-радиопередатчик, обеспечивающий устойчивый прием информации в радиусе до 50 км. Антенна передатчика — 11-метровый штырь — расположена в верхней части буя, в пружинящей опоре. К бую подвешивается балласт, масса которого зависит от ожидаемой скорости ветра; вместо балласта может подвешиваться термисторная цепь. Кроме того, волнограф имеет якорную систему, состоящую из троса, закрепленного в нижней части буя, эластичного элемента и якоря в виде цепи или бетонных блоков. Благодаря размерам, массе корпуса и методике установки волнографа для работы высокочастотное волнение срезается начиная с 0,8 Гц, т. е. исключается возможность измерения волн с периодами меньше 3—4 с. Автоматическая обработка результатов измерений на пункте приема информации позволяет рассчитывать средний период за 10 мин, фиксировать экстремальные и средние значения высоты волн, а также форму волнения.

**Волнограф «Вейстрек»** состоит из сферической формы поверхностного буя, выполненного из литого алюминия и соединенного с помощью жесткой штанги с герметичным контейнером в подводной части. В контейнере на гибкой связи подвешен акселерометр. Собственная частота отклонений акселерометрического датчика от вертикали за высокочастотной границей диапазона частот измеряемых волн составляет около 8 Гц. Гидродинамическое сопротивление движению в воде штанги с контейнером, имеющим специальное оперение из продольных металлических пластин, и датчика в контейнере с демпфирующей жидкостью таково, что обеспечивается наиболее благоприятный аperiодический режим колебаний датчика относительно вертикали. В остальном он не отличается от волнографа «Вейрайдер».

**Волнограф «Вейскрейстбуй»** выполнен из двух буев сферической формы. В одном из них, измерительном, размещены акселерометрический датчик с системой низкочастотной маятниковой подвески в демпфирующей жидкости, измерительная схема, блок питания, УКВ-радиопередатчик с антенной в верхней части корпуса. Второй буй, несущий, предназначен для крепления якорной системы. Оба буя связаны между собой штангой, узел крепления которой к бую обеспечивает возможность их относительного поворота. Основным преимуществом данного волнографа является развязка измерительного буя от якорной системы, что практически приводит к независимости передаточной характеристики прибора от динамических возмущений, которая вызвана методикой постановки на якорь.

**Автономный волноизмерительный буй**, разработанный в ГОИНе, состоит из двух буев (рис. 7.7) — измерительного (3) и несущего (1).

Измерительный буй выполнен в виде сферы диаметром 815 мм. Внутренняя полость его заполнена демпфирующей жидкостью — трансформаторным маслом, — в которой находится акселерометрический датчик на кардановом подвесе. Буй для вертикальной стабилизации снабжен противовесом, а для положительной плавучести — внешним пенопластовым кольцом.

Несущий буй представляет собой герметичный контейнер цилиндрической формы с коническими крышками высотой 850 мм и диаметром 580 мм. Внутри буя размещены: блок обработки сигнала датчика, устройство управления, компас, аккумуляторы, устройство преобразования энергии волн в электрическую энергию, УКВ-радиостанция со штыревой антенной в верхней части контейнера, на верхушке которой закреплен сигнальный огонь. Нижняя коническая крышка несущего буя через вертлюг и капроновый фал (4) соединена с якорем (5).

Устройство преобразования энергии волн в электрическую энергию представляет собой генератор постоянного тока ГРП-16/60 и инерционную массу. Статор генератора неподвижно связан с буюм, а инерционная масса — с его ротором, ось которого совмещена с вертикальной осью буя. Акселерометрический датчик позволяет измерять вертикальные ускорения в диапазоне  $\pm 1,5g$  при изменении его выходного напряжения на  $\pm 8$  В. Он представляет собой механическую маятниковую систему с преобразователем углового перемещения маятника в электрический сигнал. Подвеска датчика в измерительном бую выполнена низкочастотной. Период ее собственных колебаний равен 40 с и лежит вне диапазона периодов измеряемых волн.

Оба буя в области их ватерлинии соединены между собой двухжильным кабель-тросом, заключенным в оболочку, сочлененную из плавучих цилиндрических элементов (2). Подобная конструкция ограничивает кривизну кабель-троса, не позволяя сближаться буям, и ориентирует всю конструкцию волнографа вдоль генерального направления распространения волн.

Волноизмерительный буй предназначен для измерения параметров волн на глубинах до 150 м. Диапазон измерения волнографа по высоте волн  $h$  составляет 0,25—20 м с погрешностью  $\pm(0,1-0,05h)$  м, а периода волн 1,0—20 с с погрешностью  $\pm 0,5$  с. Передача информации осуществляется на расстоянии до 15 км.

Регистрировать вертикальные перемещения буя, кроме того, можно, измеряя колебания атмосферного давления с помощью барографа, установленного на этом бую. Такие приборы, представляющие в сущности разновидность барометра, недороги и сравнительно просты в эксплуатации. Еще в конце двадцатых годов XX в. В. В. Шулейкин

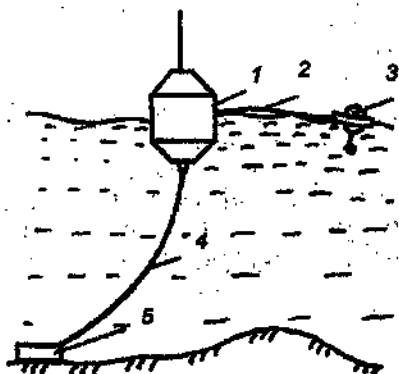


Рис. 7.7. Автономный волноизмерительный буй.

Угол обозначения см. текст.

предложил прибор подобного типа, но в то время он не нашел широкого применения.

В настоящее время используется буй с установленным на нем *микробарографом* (СПА), позволяющим регистрировать волновое возвышение. Микробарограф снабжен специальными испарителями для капель воды, проникших через отверстия внутри прибора, что в свою очередь вносит погрешность за счет избыточного давления паров воды и колебания температуры воздуха вблизи мембраны.

### Альтиметры

Альтиметры объединяют всю волноизмерительную аппаратуру, с помощью которой неконтактным способом можно определить расстояние от какого-то фиксированного уровня до возмущенной водной поверхности. Расстояние определяется с помощью либо импульсной техники (сигнал излучается импульсами, и определяется сдвиг во времени между излученными и принятыми импульсами), либо модуляционной техники (сигнал несущей частоты модулируется по амплитуде или по частоте, и также определяется сдвиг во времени). Альтиметры разделяются на системы, работающие в надир (надводные) и в зенит (подводные). Но в обоих случаях носитель может быть неподвижным (надводная или подводная платформа, дно моря) или движущимся (самолет, ИСЗ, подводная лодка). В последнем случае обязательно учитываются вертикальные колебания носителя, направление движения его относительно генерального направления волн и угловое распределение энергии в спектре. Точность измерения волновых возвышений определяется диаметром пятна облучения и пространственным спектром поверхности. К приборам, работающим в надир, относятся радары, лазеры, инфракрасные альтиметры и сонары (ультразвуковые эхолоты), к приборам, работающим в зенит, — сонары. К альтиметрам относят также доплеровский и радиозотонный альтиметры и регистратор жесткости космических лучей. Остановимся на приборах, работающих в зенит, так как приборы, работающие в надир, изучаются в других дисциплинах. Из этих приборов в океанологической практике наибольшее применение нашли гидроакустические устройства для измерения характеристик волнения.

Гидроакустические устройства позволяют измерять высоту волн на водной поверхности посредством непрерывных или импульсных ультразвуковых колебаний. Схема устройства содержит стационарные пересекающиеся под прямым углом антенные элементы, располагающиеся на дне. Каждый из них имеет нацеленную на водную поверхность веерообразную диаграмму направленности. Для передачи зондирующих сигналов и приема отраженных используются две расположенные под прямым углом и пересекающиеся диаграммы направленности, оси симметрии которых совпадают. При этом на участке пересечения происходит перемножение этих диаграмм направленности, что дает возможность сфор-



Рис. 7.8. Акустический измеритель волнения модели 480.

мировать острую, высокоэффективную диаграмму направленности зондирующего луча.

Подобное устройство, обеспечивающее требуемую точность измерений при использовании на больших глубинах, но требующее точной установки параллельно водной поверхности, было предложено в Японии (патент № 50-15371). На этом же принципе работает выпускаемый серийно в Японии прибор USW 182, обеспечивающий точность измерений  $\pm 1\%$  и работающий на частоте 200 кГц.

*Акустический измеритель волнения модели 480* фирмы «Ocean Research Equipment» работает по принципу обратного эхозондирования. Подводный блок (рис. 7.8) состоит из устанавливаемой на дне на глубине до 600 м конструкции, в которой на кардановом подвесе смонтирован гидроакустический излучатель, направленный к поверхности моря, с очень узким лучом (ширина луча  $\pm 1^\circ$ ) и с рабочей частотой 200 кГц, а также контейнер с электроникой. Ультразвуковые импульсы, излучаемые генератором, доходят до водной поверхности и, отражаясь от границы раздела вода—воздух, возвращаются назад на вход приемника акустического волномера. Время между излучением и приемом импульса служит мерой расстояния между акустическим волномером и поверхностью моря. Профиль волны, перемещаясь по водной поверхности, изменяет расстояние, проходимое ультразвуковым импульсом, что и фиксируется прибором, разрешающая способность которого 2,5 см, а точность измерений до 5 % от высоты волны.

Кроме ветрового волнения система может регистрировать и другие колебания уровня: приливы, зыбь, цунами.

Устройство связано кабелем (длиной до 10 000 м) с измерительным пультом, который может находиться на берегу, на борту судна или на платформе. Получаемая информация непрерывно регистрируется аналоговым самописцем.

## Оптические методы

В прибрежной зоне при съемке волномерных реек или вех используется главным образом киноаппаратура. При проведении наблюдений на больших акваториях для получения комплексных характеристик волнения используется *стереофотосъемка волнения*. Стереофотограмметрический метод основан на анализе пары снимков (стереопара) поверхности моря, когда используется особенность бинокулярного зрения, благодаря которому человек может ощущать наблюдаемые им объекты пространственно, т. е. оценивать их взаимное расположение в пространстве. В нашем случае при стереоскопическом рассматривании стереопары возникает оптическая трехмерная модель морского волнения, а в результате обработки этой стереопары получают поле волновых возвышений и строят план взволнованной поверхности в изогипсах. Стереоснимки получают с помощью двух фотоаппаратов, оптические оси которых параллельны и разнесены на определенное расстояние (базис съемки). Стереофотоаппараты устанавливают на берегу, одном или двух судах и различных летательных аппаратах.

Фотограмметрический метод исследования волнения был впервые использован в 1906—1907 гг. на германских судах «Планета» и «Пруссия». В 1907 г. академик А. Н. Крылов впервые применил фототеодолит на к/л «Уралец» у мыса Айя на Черном море. В 1918 г., исследуя качку судов, он фотографировал волнение с парохода «Метеор» в Атлантическом океане.

Основной недостаток оптических методов заключается в том, что они требуют достаточной освещенности моря, за исключением измерения характеристик волнения с помощью лазера.

В ИОФ РАН разработан микроволновый доплеровский *радиолокационный волномер-профилометр* (РЛВП), позволяющий производить измерение профиля волны. Источником электромагнитного излучения в нем (рис. 7.9) является диод Ганна (ДГ) (1), помещенный в резонатор и снабженный теплоотводом.

При работе РЛВП высокочастотное излучение от ДГ проходит через детекторную секцию (2), состоящую из волновода сечением  $28 \times 10$  мм с прорезью вдоль широкой стенки волновода, зонда, пропускающего через щель волновода, и каретки перемещения зонда, позволяющей изменять положение относительно ДГ с точностью 0,1 мм.

Детектором (Д) служит диод Д608А. Облучение поверхности производится с помощью либо рупорной антенны (3), либо параболической.

Отраженное от водной поверхности высокочастотное излучение возвращается в волноводный тракт РЛВП. Из-за эффекта Доплера отраженное излучение имеет ча-

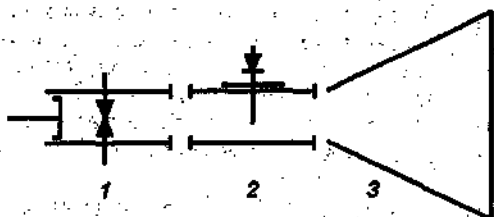


Рис. 7.9. Радиолокационный волномер-профилометр.

Усл. обозначения см. текст.

стотный сдвиг, пропорциональный скорости перемещения элементов водной поверхности. Взаимодействие падающей и отраженной частот вызывает колебания токов, протекающих через Д и ДГ. В этом случае главным фактором, определяющим частоту изменения тока, протекающего через ДГ, будут колебания времени запаздывания сигнала по мере прохождения профиля волны из-за изменения расстояния между водной поверхностью и ДГ. Получаемая информация может быть отложена в память компьютера, выведена на графопостроитель, обработана и записана на магнитный носитель.

### Судовые волнографы

Всегда существовала насущная необходимость в волнографе, размещаемом непосредственно на борту судна и используемом для исследования механизма возникновения, развития и затухания ветрового волнения, а также поведения судна при различном волнении как на ходу, так и в дрейфе. Измерение характеристик волнения с борта судна можно производить с помощью альтиметров, электродных волнографов, стереофотоаппаратуры и т. п., но в любом случае требуется введение поправок на качку судна. Большое распространение в океанологической практике в качестве судового волнографа получил прибор, предложенный М.И. Такером.

*Волнограф Такера* позволяет измерять на малом ходу судна, с судна, лежащего в дрейфе или стоящего на якоре, гидростатическое давление в фиксированной точке на небольшой глубине датчиком волнения, встроенным в обшивку судна в плоскости его центра тяжести, и вертикальное перемещение этой точки акселерометром с двойным интегрированием выходного сигнала.

Прибор монтируется посередине корпуса примерно на 3 м ниже ватерлинии. Гидростатическое давление через отверстие в корпусе судна воздействует на тензометрический датчик, который преобразует это давление в электрический сигнал. Изменение гидростатического давления в этом случае зависит от высоты волны и мгновенного положения судна относительно его положения покоя (качка судна). Для исключения влияния качки судна на выходной сигнал датчика давления рядом с ним на кардановом подвесе помещен тщательно установленный вертикальный акселерометр. С помощью РС-фильтров и других электрических цепей осуществляется двойное интегрирование выходного напряжения акселерометра. В результате на выходе акселерометра получают сигнал, определяющий мгновенную высоту датчика давления. Таким образом, влияние вертикальных перемещений судна исключается из показаний датчика гидростатического давления.

Если прибор установлен на наветренном борту судна, то вследствие эффекта отражения волны будет регистрироваться завышенная высота волн, а при установке на подветренном борту — заниженная. Для исключения подобного эффекта датчики размещают на обоих бортах судна, при этом регистрируется среднее арифметическое из показаний двух приборов. Кроме того, во время измерений

рекомендуется судно устанавливать носом на волну, что также уменьшает влияние подобного эффекта. Но в любом случае корпус судна деформирует волны в месте установки датчиков. Таким образом, по результатам расчетов и экспериментов случайная погрешность измерения высот волн волнографом Такера достигает 10 %, а волны с периодом менее 4 с вообще не регистрируются.

**Волнограф судовой ГМ-62** предназначен для измерения высот и периодов волн с судна в открытом море. Кроме того, он может использоваться для регистрации вертикальной качки той части судна, где подвешены датчики, т. е. линейных колебаний этой части вдоль вертикальной оси.

В качестве преобразователя волновых колебаний в электрические сигналы используется струнный (резистивный) датчик в виде безокисной нихромовой проволоки длиной 15—20 м и диаметром 0,3 мм, натянутой вертикально и погруженной в воду примерно на половину своей длины. При этом выходной сигнал проволочного датчика является линейной функцией двух переменных: волновых колебаний водной поверхности и вертикальных колебаний самого датчика, вызванных качкой судна. Для измерения вертикальных колебаний проволочного датчика в точке, где он установлен, помещается еще датчик гидростатического давления — датчик качки. Он является модификацией датчика волнографа ГМ-16, в котором упрощена конструкция, увеличена надежность, а масса доведена до 22 кг при небольших изменениях его габаритов ( $\varnothing 95 \times 400$  мм) за счет совмещения дополнительного груза с корпусом датчика. Датчик качки, так же как и датчик ГМ-16, опускают в воду на глубину более половины длины волны. Проволочный датчик наматывают крутой спиралью (один виток на 25 см) на жгут проводов датчика качки. Оба эти датчика имеют линейные характеристики, равные чувствительности, равные и постоянные выходные сопротивления измерительных схем (100 Ом). Обеспечение этих требований является обязательным условием для правильного суммирования по методу сложения токов выходных напряжений соединенных параллельно датчиков.

Таким образом, волнограф ГМ-62 состоит (рис. 7.10) из проволочного датчика волновых колебаний (2), датчика гидростатического давления (датчика качки) (1) с линией связи, подъемного устройства (3), электромеханической лебедки с токоприемником (4), блока питания и контроля (5), измерительного блока (6) и аналогового регистратора (7).

Датчики волнографа подвешиваются на крамболе по носу или корме судна на расстоянии (в зависимости от водоизмещения) 3—7 м от него. Место расположения датчиков обусловлено тем, что при положении суд-

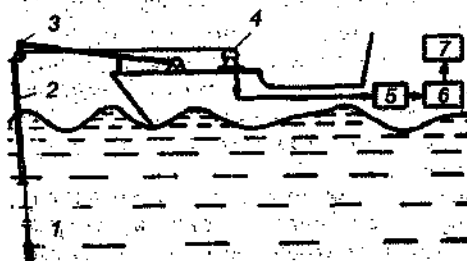


Рис. 7.10. Структурная схема волнографа ГМ-62.

Усл. обозначения см. текст.

на на малом ходу (1—2 узла) «носом или кормой на водну» набегające на него волны не деформируются корпусом судна на некотором от него расстоянии.

В Московском инженерно-физическом институте разработана «Система путевого измерения характеристик волнения океана», предназначенная для измерения волнения на ходу судна и состоящая из: датчика волнения, датчика качки судна, двух аналого-цифровых преобразователей, блока вывода информации на магнитную ленту, магнитного накопителя и компьютера.

Датчиком волнения системы служит емкостный датчик, емкость которого образована отрезком изолированной длинной линии (кабель-трос), погруженной на половину своей длины в воду, и бортом судна. Кабель-трос включен в автогенераторную схему. Выходной сигнал генератора пропорционален емкости кабель-трос — борт судна, которая в свою очередь является линейной функцией профиля волны.

Движение судна в море принято рассматривать как движение твердого тела с шестью степенями свободы, при этом в данном случае нас интересуют три основных: бортовая, килевая и вертикальная качки. К сожалению, учесть все три типа качки возможно лишь при усложнении системы измерения и алгоритма обработки. Но при ограничении маневрирования судна по отношению к фронту волны можно ограничиться, как в данной системе, измерением только вертикальной качки. Для этой цели здесь используется пьезорезонансный акселерометр, установленный в точке подвеса датчика волнения, что позволяет ему учитывать вертикальные перемещения качки. Информация с датчиков преобразуется в 16-разрядный двоично-десятичный код с помощью АЦП (промышленный частотомер ЧЗ-32). Регистрация получаемой информации осуществляется через блок вывода на магнитный накопитель методом фазового кодирования.

Таким образом, в настоящее время существует большое число устройств для измерения характеристик волнения, отличающихся диапазоном измерений, точностью, числом регистрируемых элементов, способом использования и рядом других параметров. По точностным характеристикам первенство принадлежит стационарным волнографам, которые устанавливаются на неподвижную или малоподвижную опору. Такие волнографы, несмотря на различные способы измерения, имеют погрешность в пределах 1—5 % и теоретически неограниченный диапазон измерения высот волн.

Волнографы, устанавливаемые на судне или связанные с ним кабелем, тросом и т. п., имеют заметно меньшую точность, что вызвано наличием этой связи и искажением картины волнения судном. Подобные волнографы имеют большой разброс значений ошибок измерения — от 1,5 до 20 % — и диапазон измерения высот волн около 20 м.

Промежуточное положение занимают автономные волнографы, не имеющие механической связи с другими телами. Устройства такого типа имеют меньшую точность, чем стационарные волнографы, но заметно меньший разброс погрешностей измерений (1,5—4 %).



Диапазон измерения автономных и судовых волнографов примерно одинаков. Отдельно следует выделить средства измерения волнения, не имеющие непосредственного контакта с водной средой, например оптические и радиоволномеры. Однако у первых затруднена регистрация при визуальных наблюдениях либо полученные данные характеризуют интегральную картину волнения на некотором участке, а вторые принципиально могут измерять лишь усредненное значение высот волн на определенной линии.

Наиболее универсальными, по-видимому, следует считать автономные волнографы, которые можно использовать для измерений как в прибрежной зоне, так и в открытом море. Точность таких волнографов в основном определяется преобразованием какого-либо параметра волнения в электрический сигнал и зависит от целого ряда требований, предъявляемых к прибору.

Универсального волнографа для океанологических исследований не существует. Определение вторичных параметров волнения, таких, как период, средняя длина и высота волн, спектр, выполняется специальной аппаратурой и также зависит от точности преобразования физического параметра в электрический сигнал.

К сожалению, в настоящее время средства для стандартных измерений поверхностного волнения не выпускаются промышленностью из-за отсутствия поверочных схем и средств проверки, так как терминологическая и понятийная базы описания процесса не стандартизованы, а требования к метрологическим характеристикам рабочих средств измерения не нормированы.

## 7.5. Определение силы удара волн

При проектировании и эксплуатации прибрежных гидротехнических сооружений — молов, волноломов и других портовых систем — очень важными являются наблюдения за динамическими характеристиками морских волн, в частности за волновыми нагрузками на береговые сооружения.

В порту Туапсе в 1926 г. проводились первые исследования воздействия волн на береговые сооружения. По предложению профессора Федорова и инженера Кузнецова там был открыт первый пост наблюдений. Позднее, в 1928—1929 гг., были созданы волноизмерительные станции в портах Ялта и Поти. За рубежом в течение 1930—1939 гг. были открыты станции в портах Дьепп, Генуя, Неаполь. В настоящее время наиболее совершенной в России является Сочинская волноизмерительная станция (ВИС), начавшая работу в 1953 г. и предназначенная для проведения комплексных исследований динамических характеристик морских волн в натурных условиях на подходе к портовым ограждающим сооружениям, а также воздействия волн на эти сооружения и прибрежную портовую акваторию.

В комплекс этой станции (рис. 7.11) входят: металлический массив-гигант, помещенный в центре мола, наблюдательная башня на оконечности этого мола и наблюдательная вышка на оконечности



Рис. 7.11. Волноизмерительная станция.

другого мола. Приборы и оборудование ВИС для измерений волнового давления на вертикальную стенку, колебаний массива под воздействием волн, а также для запуска и автоматического регулирования работы станции установлены в массиве-гиганте.

Этот массив состоит из надводных помещений и донной галереи, связанных шахтой. В верхних помещениях расположены энергетический и вспомогательный отсеки, а также аппаратная, в которой находятся указатели высот волн на подходах к молу и у стенки, вибрографы, щит автоматического управления и другое оборудование. Приборы для измерения заветшивающего давления и водосборник расположены в донной галерее. Из соединительной шахты через шлюзовые аппараты выведены наружу датчики волнового давления.

Для комплексного исследования динамических параметров волнения необходимо проводить наблюдения за характеристиками волнения и ветра. Волноизмерительная аппаратура (электроконтактный волнограф и аппараты для стереофотосъемки волнения) и приборы для инструментальных наблюдений за ветром (модифицированный анеморумбометр М-47 с непрерывной записью скорости и направления ветра) установлены в наблюдательной башне.

При шторме, когда нет возможности попасть на башню, и в случае необходимости иметь более полные данные о характеристиках волн на подходе к порту наблюдения за волнением и его кинофотосъемка производится с наблюдательной вышки на оконечности другого мола.

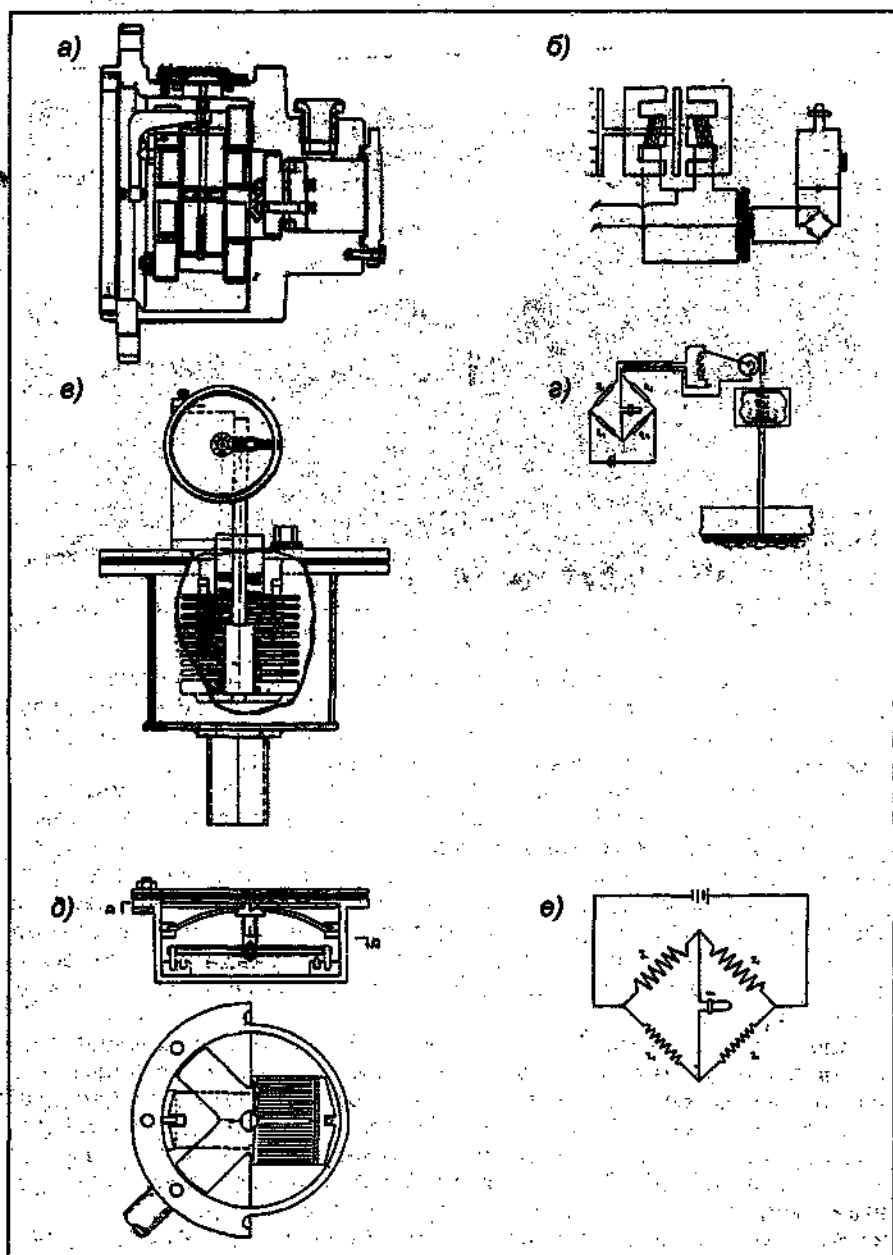


Рис. 7.12. Основные типы динамографов (а, в, д) и их схемы (б, з, е).

б: 1 — приемная мембрана, 2 — индуктивный датчик, 3 — источник переменного тока, 4 — дифференциальный трансформатор, 5 — выпрямительно-сглаживающий блок, 6 — осциллограф.  
Остальные усл. обозначения см. текст.

На Сочинской ВИС используется также ряд специальных приборов: вибрографы и сейсмографы, применяемые для измерений колебаний массива-гиганта станции под ударами волн; динамографы различных систем для определения силы удара волн.

Динамографы по принципам действия датчиков можно разделить на три основных типа: индуктивные, сильфоно-реостатные и тензометрические (рис. 7.12).

В датчике индуктивного динамографа (рис. 7.12 а) мембрана (1), воспринимающая волновое давление, связана с подвижным сердечником трансформатора (2). На датчик подается переменное напряжение. С трансформатора (2) сигнал, пропорциональный волновому давлению, поступает на дифференциальный разделительный трансформатор (4), затем выпрямляется с помощью диодного моста (6), фильтруется Г-образным LC-фильтром и попадает на шлейф (5) регистрирующего осциллографа.

Первичным измерительным преобразователем сильфоно-реостатного динамографа (рис. 7.12 б) является сильфон, у которого подвижный конец связан с ползуном реохорда. Реохорд включен в мост постоянного тока, к измерительной диагонали которого подсоединен шлейф осциллографа. Таким образом, разбаланс моста, вызванный изменением сопротивления реохорда (которое пропорционально измеряемому волновому давлению), фиксируется измерительным осциллографом.

Следует отметить, что основным недостатком этих двух типов динамографов является большая постоянная времени, что не позволяет достаточно надежно регистрировать кратковременные «цикловые» значения давления большой интенсивности при ударах волн о вертикальную стенку. Этого недостатка нет в тензометрическом динамографе.

Первичным измерительным преобразователем тензометрического динамографа (рис. 7.12 в) является упругая мембрана плоской или полукруглой формы, которая непосредственно воспринимает давление. При этом центр мембраны жестко связан с пластиной с наклеенными тензомерами. Тензометры соединены между собой по мостовой схеме. Измерительная диагональ моста подключена непосредственно на шлейф измерительного осциллографа.

Целый ряд приборов для измерения волновых нагрузок разработан в Институте океанологии РАН. Среди них следует отметить индукционные динамографы ИДК-1, ИДК-2, индукционный измеритель вектора гидродинамического давления ВДК-И.

## Глава 8

### ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ТЕЧЕНИЯМИ

#### 8.1. Поле течений в океане

Приступая к рассмотрению вопроса об измерении течений в Мировом океане, необходимо остановиться на современных представлениях о физической сущности самой измеряемой величины, т. е. скорости и направлении течений.

Возникновение течений, связанное с общей циркуляцией, является следствием различных гидрометеорологических процессов, протекающих как в планетарном, так и в региональном масштабах. Все это вызывает как горизонтальные, так и вертикальные циркуляции. Изменчивость океанических течений во времени и пространстве изучена еще явно недостаточно, а методология и технология измерения вертикальной циркуляции в настоящее время находятся еще в начальной стадии. Самые высокие скорости течения (3—5 м/с и выше) наблюдаются в узкостях и проливах. Максимальные скорости таких мощных океанических течений, как Гольфстрим, Куросио, достигают 2,0—2,5 м/с, экваториальных противотечений 1,0—1,5 м/с, средняя скорость обычных океанических течений составляет примерно 0,1 м/с, а средняя меридиональная скорость глубинной циркуляции около 0,035 м/с.

Кроме того, в потоке обычно наблюдается турбулентный режим движения воды, характеризующийся перемешиванием водных масс, вызывающим пульсацию скоростей как по значению, так и по направлению. Существующая аппаратура позволяет измерять подобные изменения скорости и направления течений во времени. Проведенные исследования показывают, что, например, пульсационные изменения происходят с большой частотой, причем на отдельные пики значительной амплитуды накладываются пики меньшей амплитуды, но большей частоты.

Измерения течений в океане до недавнего времени проводились, как правило, для получения географических представлений о скоростях течений, переносе водных масс и других подобных сведений. В связи с развитием гидродинамики океана в настоящее время результатам измерений скоростей течений стали придавать несколько иное значение. Так, например, открытие явления синоптического вихреобразования в океане, мощных вихрей с размерами в десятки и сотни километров, энергия течений в которых намного превосходит энергию крупномасштабной циркуляции вод в океане, в значительной мере предопределило дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных исследований по динамике океана.

Течения измеряются либо в полярной системе координат, когда регистрируется модуль скорости и угол его ориентации относительно магнитного меридиана, либо в декартовой системе координат, когда измеряются проекции вектора скорости на ортогональные оси координат и углы ориентации этой системы координат относительно магнитного меридиана. По результатам измерений во втором случае определяются проекции вектора скорости течения на меридиан и параллель. К точности измерений течений в океане, а точнее скоростей движения воды, в настоящее время предъявляются высокие требования, так как результаты измерений необходимы для исследования динамических балансов, эффектов взаимодействия движений разных пространственно-временных масштабов, а также для оценки существующих и разработки новых теоретических концепций.

## 8.2. Методы наблюдений за течениями

Исследования гидродинамических процессов в Мировом океане основываются на прямых и косвенных методах измерения скорости потоков. Выбор того или иного метода измерения параметров течений и характеристик измерительной аппаратуры в первую очередь определяется целью исследований для необходимого диапазона масштабов и способа описания движения. В зависимости от этого используются измерения в фиксированной точке или разнесенные по пространству, выбирается количественный и качественный состав аппаратуры.

В настоящее время существует много способов измерений параметров течений, основанных на различных физических принципах. В соответствии с этими принципами можно выделить несколько основных методов измерений характеристик течений на различных глубинах, в поверхностном и придонном слоях: 1) навигационный; 2) поплавочный; 3) гидродинамический (вертушечный); 4) электромагнитный; 5) термодинамический; 6) акустические; 7) оптические; 8) вихревой; 9) метод меток; 10) электрохимический; 11) неконтактные.

*Навигационный метод* долгое время был одним из самых распространенных методов наблюдений за течениями. Основные сведения о поверхностных течениях Мирового океана получены путем обработки массовых навигационных определений, заключающихся в сопоставлении счислимых и обсервованных мест судов. Счислимое место судна находится путем прокладки на карте истинного курса судна и пройденного расстояния по лагу. Обсервованное место определяется по данным наблюдений за небесными светилами с помощью секстанта или радиометрических методов: радиопеленгования, радиолокации, спутниковой навигационной системы. Направление сноса определяется направлением вектора, соединяющего счислимое место с обсервованным, а скорость — путем

деления расстояния между ними на промежуток времени между наблюдениями  $t$

$$U_T = \int_0^t \bar{U}_T dt / t,$$

где  $\bar{U}_T$  — вектор течений,

$$\bar{U}_T = \bar{S}_T / t,$$

где  $\bar{S}_T$  — вектор сноса течением за промежуток времени  $t$ .

Средняя квадратическая ошибка вычисленных характеристик течений складывается из соответствующих ошибок положения считанных и обследованных точек

$$\sigma_T = (1/t) \sqrt{\sigma_{сч}^2 + \sigma_{от}^2 + \sigma_{пр}^2},$$

где  $\sigma_{сч}$ ,  $\sigma_{от}$ ,  $\sigma_{пр}$  — средние квадратические ошибки счисления и обследований в точках отшествия и пришествия соответственно.

При статистической обработке большого числа наблюдений (иногда достигающего нескольких тысяч) удается исключить неизбежные ошибки, связанные с несовершенством применявшихся в прошлом навигационных приборов и с неточностью метода.

**Поплавочный метод** измерения течений основан на определении положения в пространстве и во времени поплавков, движущихся с поверхностными водами в потоке. Для измерения характеристик течений используются различного типа поплавки, которые могут запускаться как на водную поверхность, так и на требуемую глубину (поплавки нейтральной плавучести). Скорость течений принимается равной скорости движения поплавка, определяемой по времени прохождения им определенного расстояния. Она является осредненной для участка потока по траектории движения поплавка. Это допущение значительно упрощает определение скорости, хотя, как известно, тело, плывущее по течению, движется быстрее окружающих его частиц воды. Это объясняется наличием неуравновешенной проекции веса тела на ось движения. Рассмотрим силы, действующие на тело, плывущее в состоянии безразличного равновесия (рис. 8.1). Расположим центр тяжести тела в начале прямоугольной системы координат, а ось абсцисс направим по течению параллельно поверхности воды. Подъемная сила действует по нормали к водной поверхности, а ее проекция на ось дви-

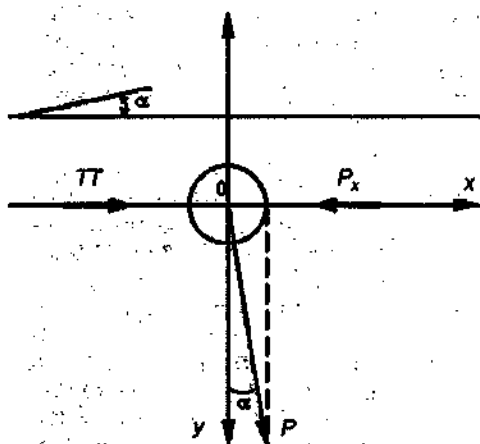


Рис. 8.1. Силы, действующие на тело, плывущее в состоянии равновесия.

жения, хотя, как известно, тело, плывущее по течению, движется быстрее окружающих его частиц воды. Это объясняется наличием неуравновешенной проекции веса тела на ось движения. Рассмотрим силы, действующие на тело, плывущее в состоянии безразличного равновесия (рис. 8.1). Расположим центр тяжести тела в начале прямоугольной системы координат, а ось абсцисс направим по течению параллельно поверхности воды. Подъемная сила действует по нормали к водной поверхности, а ее проекция на ось дви-

жения равна нулю. Сила тяжести направлена вертикально вниз. Вес тела

$$P = \gamma V,$$

где  $\gamma$  — удельный вес;  $V$  — объем тела. Проекция веса тела на ось движения

$$P_x = \gamma V \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол наклона водной поверхности к горизонту. Сила  $P_x$  и вызывает ускорение плавущего тела, которое уменьшается за счет сопротивления воды. Поэтому тело, находящееся в потоке, приобретает скорость от нуля до значения, несколько превышающего скорость течения воды, т. е. пока сила сопротивления воды  $R$  не уравновесит движущую силу. Кроме того, на поплавок, находящийся на поверхности воды, воздействуют ветер и волнение. Поэтому габариты, плавучесть и загрузка буев должны быть такими, чтобы их подводная парусность во много раз превосходила парусность надводной части для сведения к минимуму влияния ветра на движение буйа.

Общей особенностью поплавочного метода является получение данных в такой системе координат, когда за независимые переменные берутся начальные координаты  $x_0$  и прошедшее с начального момента время  $\tau_0 + \Delta\tau$ . Текущие координаты определяются следующим образом:

$$x = (x_0, \tau_0 + \Delta\tau); \quad x_0 = (x_0, \tau_0).$$

Скорость течения определяется как производная по времени от координаты

$$U(x_0, \tau_0 + \Delta\tau) = \frac{\partial}{\partial T}(x_0, \tau_0 + \Delta\tau),$$

$$x - x_0 = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau} U(x_0, \tau_0 + \Delta\tau) d\tau.$$

Исследование течений с помощью поплавков осуществляется двумя способами: непосредственным наблюдением за перемещением поплавков и массовым разбрасыванием маркированных поплавков, подбираемых впоследствии на побережье или другими судами (бутылочная почта).

При первом способе используются поверхностные поплавки, поплавки нейтральной плавучести, поплавки с подводными парусами, случайно плавающие предметы и т. п. Эти средства обладают свойствами (или снабжаются специальными устройствами) активного и пассивного действия, позволяющими определять их местоположение в любой момент времени с помощью судовых навигационных систем сопровождающего судна или системы спутникового слежения за дрейфом буев.

Поплавки нейтральной плавучести обладают нулевой плавучестью в слое воды с определенной плотностью, что позволяет им дрейфовать в этом слое в течение длительного времени. Местоположение их определяется либо с судна, либо автономными акустическими станциями, либо



специальной акустической системой, позволяющей определять координаты поплавков на больших расстояниях. Последние получили название поплавков СОФАР по названию береговой системы станций для дальнего наблюдения за источниками акустических сигналов.

*Гидродинамический метод* основан на измерении давления, оказываемого потоком на находящееся в нем тело. Между скоростью течения и давлением, оказываемым потоком на тело, существует зависимость

$$P = C_m \rho U^2 S_r / 2,$$

где  $P$  — давление потока на тело;  $C_m$  — коэффициент, зависящий от формы тела и числа Рейнольдса;  $\rho$  — плотность воды;  $S_r$  — площадь проекции на плоскость, нормальную направлению потока.

Отсюда

$$U = \sqrt{2P / (C_m \rho S_r)},$$

т. е., измерив давление потока на тело, можно определить и скорость течения. Но этот метод в своем прямом приложении не нашел широкого применения, так как обладает существенно нелинейной характеристикой преобразования в диапазоне скоростей течения 0,02—2 м/с.

Наибольшее распространение среди датчиков гидродинамического типа нашли так называемые *вертушечные*. Здесь в качестве чувствительного элемента используются: ротор Савониуса, лопастной винт (пропеллер), крылатки, крест Робинсона, винт Архимеда, причем чаще всего первые два типа. Принцип их действия основан на создании набегающим потоком воды на чувствительном элементе гидродинамического момента, приводящего к его вращению. Скорость вращения датчика пропорциональна скорости потока, и наблюдается практически линейная зависимость между скоростью потока и числом оборотов датчика  $n$ , т. е.  $U = f(n)$ .

Опыт практического использования различных типов датчиков скоростей течения с учетом возможных колебаний из-за турбулентных и волновых воздействий показал, что наилучшими свойствами для измерения характеристик течений обладают реверсивные датчики. Этот тип датчиков автоматически исключает компоненты скорости с периодами меньше, чем время экспозиции (время осреднения характеристик течения прибором). Нереверсивные датчики независимо от скорости и в некоторых случаях от направления потока вращаются только в одну сторону. Наиболее распространенными и наиболее простыми по конструкции реверсивными датчиками скорости являются различные виды пропеллеров. Из всех типов датчиков пропеллер и винт Архимеда обладают наименьшей инерционностью 0,5—10 с, начальная скорость их от 0,005 до 0,01 м/с и им необходимо ориентирование по потоку.

Ротор Савониуса и крест Робинсона обладают диаграммой направленности, близкой к круговой, т. е. им не нужно ориентирование по потоку. Они обладают такой же начальной скоростью, что и пропеллеры, но до скорости 0,03 м/с имеют нелинейный началь-

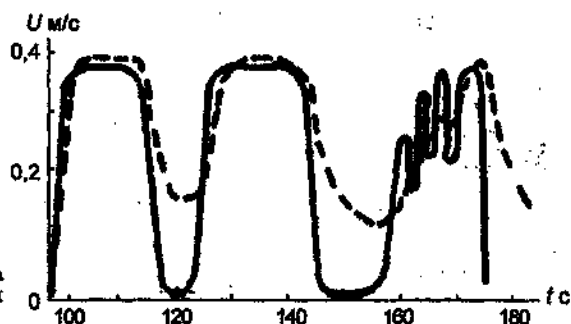


Рис. 8.2. Реакция ротора на скачкообразные изменения скорости потока.

ный участок характеристики числа оборотов в зависимости от скорости потока. Ротор Савониуса, широко используемый в измерительных системах, подвержен биологическим обрастаниям и обладает заметным гистерезисом. На рис. 8.2 представлена реакция ротора на скачкообразные изменения скорости потока от 0 до 0,4 м/с и обратно. Здесь сплошная линия — скорость потока, штриховая — показания ротора. При резком снижении скорости потока скорость вращения ротора уменьшается с большим запаздыванием, а при увеличении скорости показания ротора близки к изменению скорости потока.

Диапазон измерений скоростей течений датчиками вертупешечно-го типа лежит в пределах 0,005—3 м/с. Погрешность измерений механическими вертупками определяется в основном качеством исполнения и в лучших образцах не превышает 5 %.

Для анализа уравнения движения лопастного винта, основанного на зависимости  $U = f(n)$ , можно использовать известный закон механики: *для вращающейся системы произведение момента механической инерции системы относительно оси вращения на угловое ускорение равно сумме моментов сил, действующих на систему.* Для вертупки уравнение движения лопастного винта в общем виде представляется как

$$d\omega/dt = \sum_{i=1}^n M_i,$$

где  $\omega$  — угловая скорость;  $\sum_{i=1}^n M_i$  — сумма моментов сил, приложенных к лопастному винту:

$$\sum_{i=1}^n M_i = M_d - M_0 = M_d - M_r - M_t - M_p,$$

где  $M_d$  — движущий момент;  $M_0$  — момент сил сопротивления;  $M_r$  — момент сил гидродинамического сопротивления;  $M_t$  — момент сил трения в опорах;  $M_p$  — момент реакции регистрирующей системы. Отсюда ясно, что точность измерений скорости течений зависит от плотности среды, условий обтекания, структуры и флуктуаций течения, т. е. зависимость нелинейна и количественно может быть оценена только при рассмотрении малых отклонений от установившегося состояния.

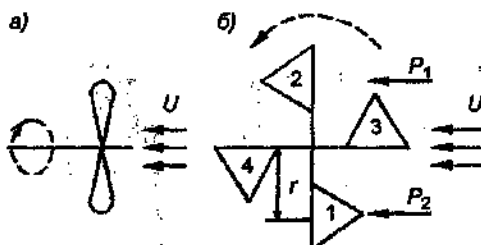


Рис. 8.3. Схемы устройств с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осями вращения.

Рассмотрим зависимость  $U = f(n)$  без учета силы трения в механизме прибора и гидродинамических сопротивлений при его обтекании. Найдем связь между  $n$  и  $U$  для пропеллеров, как наиболее распространенного типа, с горизонтальной и вертикальной осями вращения (рис. 8.3). За время  $dt$  частица жидкости, движущаяся па-

раллельно горизонтальной оси вращения (рис. 8.3 а), переместится на расстояние  $dl = Udt$ . Эта же частица жидкости за то же время  $dt$ , встретив на своем пути лопасть пропеллера, переместится по окружности на расстояние  $dl_k = 2\pi r n \cos \alpha$ , где  $r$  — расстояние от центра лопасти до оси вращения;  $\alpha$  — угол наклона лопасти к плоскости, перпендикулярной оси вращения. В первом приближении  $dl = dl_k$ , поэтому

$$Udt = 2\pi r n \cos \alpha$$

или

$$U = 2\pi r n \cos \alpha / dt.$$

Примем

$$2\pi r \cos \alpha / dt = K_r$$

и получим

$$U = K_r n,$$

где  $K_r$  — геометрический шаг лопастного винта. Геометрический шаг в основном определяет чувствительность преобразования

$$S \approx K_r (1 - S_n),$$

где  $S_n$  — так называемое скольжение, изменяющееся для различных конструкций винтов от 0,2 до 0,6.

Работа чашечного ротора (рис. 8.3 б) обусловлена различием в коэффициентах сопротивления его чашек. Гидродинамическое давление, оказываемое потоком на чашки, обращенные своей внешней поверхностью к потоку:

$$P_1 = 0,5 K_1 \rho S (U + U_q)^2,$$

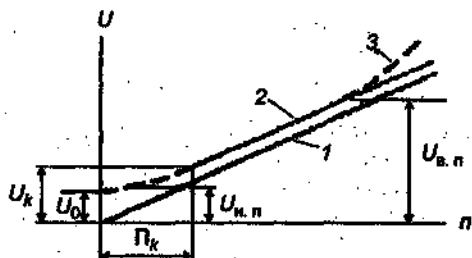
а на чашки, обращенные внутренней поверхностью к потоку:

$$P_2 = 0,5 K_2 \rho S (U - U_q)^2,$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты сопротивления чашек, причем  $K_1 < K_2$ ;  $S$  — площадь проекции чашки;  $U_q$  — линейная скорость движения центра чашки. При установившемся вращении лопастного винта  $P_1 = P_2$ , следовательно

$$K_1 (U + U_q)^2 = K_2 (U - U_q)^2.$$

Рис. 8.4. Зависимость между числом оборотов лопастного винта вертушки  $n$  и скоростью течения жидкости  $U$ . 1 — без учета сопротивления; 2 — с учетом сопротивления; 3 — при высоких скоростях течения жидкости.



Экспериментальные исследования чашек различных форм и размеров (по данным Л. Г. Качурина) показали, что гидродинамические коэффициенты сопротивления существенно зависят от форм и размеров чашек, но в любом случае их отношение остается примерно постоянным, близким к значению  $K_1/K_2 \approx 4$ , а коэффициент лопастного винта  $\sigma = U/U_{\text{к}} = U/(r\omega)$  (где  $\omega$  — угловая скорость при установившемся движении чашек без трения) примерно равен 3. Это соотношение используется при приближенном расчете параметров ротора как чашечного типа, так и винтового. Экспериментом также доказано, что в турбулентном потоке реальная вертушка в среднем завышает скорость, притом тем больше, чем сильнее пульсация течения.

Анализ графика зависимости  $U = f(n)$  (рис. 8.4) позволяет сделать следующие выводы. Под влиянием гидродинамических и механических сопротивлений функция  $U = f(n)$  принимает вид кривой 2. Наиболее заметно отклонение кривой 2 от линии 1, являющейся ее асимптотой, при малых скоростях. Полуэмпирическое уравнение в форме гиперболы, охватывающее весь диапазон работы вертушек, имеет вид

$$U = an + \sqrt{bn^2 + c}, \quad (8.1)$$

где  $a, b, c$  — параметры, определяющие работу вертушки и гидрофизические условия.

При  $n = 0$   $U = \sqrt{c} = U_0$  — отрезок на оси  $U$ , определяющий точку, в которой начинается кривая 2. В случае, когда  $U_0 < U$ , выражение (8.1) можно записать как

$$U = (a + \sqrt{b})n,$$

где учитывается не только геометрия лопастного винта, но и сопротивление его движению.

Основными рабочими характеристиками вертушек являются:

— начальная скорость  $U_0$  — наименьшая скорость набегающего на вертушку потока, при которой начинает неравномерно вращаться ее лопастной винт;

— нижний предел применимости вертушек — скорость  $U_{\text{н.п}}$ , выше которой и рекомендуется использовать вертушки (см. рис. 8.4). При скоростях от  $U_0$  до  $U_{\text{н.п}}$  показания вертушек неустойчивы, поэтому погрешности измерений в этом пределе могут быть значительными ( $\geq 10\%$ );

— критическая скорость  $U_k$  — скорость потока, выше которой влияние механических сопротивлений на число оборотов лопастного винта становится стабильным и незначительным, т. е. при  $U \geq U_k$   $dU/dn = \text{const}$ . В докритической области на показания вертушек существенно влияют износ подшипников, попадание твердых частиц в механизм прибора и т. п.;

— верхний предел использования вертушек — скорость  $U_{\text{в.п.}}$ , выше которой не всегда можно рекомендовать применение вертушек. При исследовании функции  $U = f(n)$  в воздушном потоке оказалось, что при больших скоростях потока нарушается зависимость (8.1);

— инерционность вертушек — способность их лопастного винта изменять свою скорость вращения соответственно изменению скорости потока.

При измерении датчиками вертушечного типа сложной картины течений, возникающей из-за воздействия ветровых и внутренних волн, вихревых течений и турбулентности на стационарный поток, возникает значительная погрешность. Кроме того, методика измерений течений на АБС или с борта судна не позволяет фиксировать прибор в определенной точке пространства. Перемещения прибора на тросе с несущим бумом и с судном датчик регистрирует как изменение скорости. Это приводит к появлению погрешностей, особенно проявляющихся при нахождении прибора в слое воды, в котором сказывается влияние ветрового волнения.

При измерении характеристик течения реверсивными датчиками (пропеллер, винт Архимеда) требуется их ориентирование по потоку, т. е. их ось вращения должна совпадать с генеральным направлением течения. Для достижения этой цели используется развитое хвостовое оперение, устанавливаемое на самом корпусе прибора, на котором неподвижно закреплен чувствительный элемент. Такая система используется в измерителях течения типа ВММ, БПВ, ДИСК, «Поток» и т. д. В последнее время для решения этой задачи стали использовать двухкомпонентную систему преобразователей скорости течения. В таких приборах используют два пропеллера, оси вращения которых располагаются перпендикулярно друг другу. В результате один из них измеряет составляющую  $U_1$ , а другой — ортогональную составляющую  $U_2$  скорости течения. Отсюда истинная скорость

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}.$$

Подобные двухкомпонентные системы используются в измерителях АЦИТ, VMCM и других.

В океанологической практике нашли широкое применение микровертушки с индуктивным или резистивным преобразователями выходного сигнала. Они обычно используются для измерения мгновенных скоростей потока в диапазоне 0,04—10 м/с с погрешностью 2—5 % и постоянной времени 0,01—0,2 с. Вертушка с индуктивным преобразователем, характеризующимся сравнительно высокими стабильностью и чувствительностью, измеряет скорость в диапазоне 0,1—2 м/с с погрешностью 3 %. Диаметр лопастного винта у такой вер-

тушки 10 мм. Специальный цифровой преобразователь воспринимает импульсы, амплитуда которых пропорциональна скорости вращения ротора. Измеритель пульсаций скорости потока с микровертушечным датчиком регистрирует среднюю скорость и ее медленные пульсации. Диапазон частот, охватываемый измерителем, находится в пределах 9—12,5 Гц при скорости потока 1 м/с и определяется постоянной времени самого датчика. Подобные измерители пульсаций скорости имеют линейную градуированную характеристику и отличаются конструктивной и структурной простотой, а также надежностью.

*Электромагнитный метод* основан на том, что в потоке морской воды, пересекающем магнитные силовые линии, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения частиц воды относительно магнитного поля. Наведенную ЭДС ( $E$ ), согласно закону Фарадея, можно выразить как

$$E = BLU \cos \alpha \cdot 10^{-8},$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $L$  — расстояние между электродами (база измерения);  $U$  — скорость движения воды;  $\alpha$  — угол между направлением потока и магнитным полем.

В качестве магнитного поля используются как вертикальная составляющая магнитного поля Земли, так и искусственно созданное постоянное или переменное магнитное поле. Поскольку скорость распространения электромагнитных волн соизмерима со скоростью света, электромагнитные измерители скорости течения являются практически безынерционными, и их частотные свойства в верхнем диапазоне частот определяются в основном пространственной разрешающей способностью датчиков, т. е. в принципе с их помощью можно измерять средние и пульсационные значения скорости. При этом значение ЭДС определяется путем измерения разности потенциалов между двумя электродами, расположенными в магнитном поле по линии, перпендикулярной векторам магнитной индукции и скорости потока.

При измерении течений в поверхностном слое воды можно использовать естественное магнитное поле Земли. В этом случае проводником, в котором индуцируется ЭДС, будет являться морская вода и одновременно участок кабеля между двумя неполяризуемыми электродами, который буксируется за судном. Эту ЭДС можно представить как

$$E = L H_z,$$

где  $H_z$  — вертикальная составляющая магнитного поля Земли.

Истинные значения скорости и направления течения определяются по проекциям с судна на двух взаимно перпендикулярных галсах. Но этот метод, несмотря на свою простоту, не получил широкого распространения из-за трудности интерпретации результатов измерений. В подобных измерителях скорость течения и выходной сигнал связаны сложной зависимостью, в которой задействованы глубина, вертикальный профиль скорости, электропроводимость грунта дна (при небольших глубинах), положения буксируемых электродов. На результаты измерений также оказывают влияние и магнитные возмущения. Все эти факторы трудно поддаются учету. Точ-

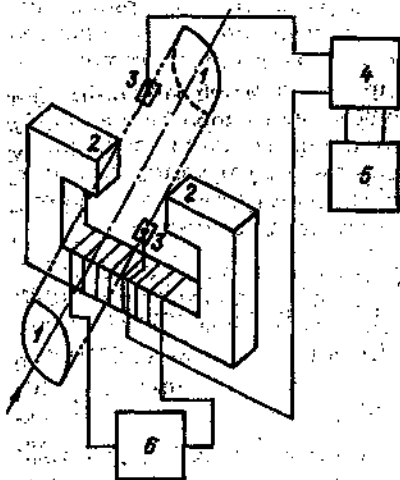


Рис. 8.5. Принципиальная схема электромагнитного измерителя скорости потока. 1 — ток; 2 — полюса магнита; 3 — электроды для объема ЭДС; 4 — УИП; 5 — регистратор; 6 — блок питания.

ность таких измерителей обычно не превышает 20—30 %.

Многие трудности можно преодолеть, если измерение скорости течения проводить в искусственном магнитном поле, индуцируемом катушками подмагничивания или создаваемом постоянным магнитом. Принципиальная схема подобных измерителей, предложенная еще самим Фарадеем, имеет вид, представленный на рис. 8.5.

Использование постоянного магнитного поля осложнено поляризацией электродов, особенно при измерении низкочастотных составляющих потока. Применение переменного магнитного поля позволяет избежать поляризации, а также использовать емкостные электроды, не имеющие непосредственного контакта с водой. Пороговая чувствительность подобных измерителей составляет  $10^{-3}$ —

$3 \cdot 10^{-8}$  м/с, а частотный диапазон охватывает несколько килогерц. Их динамический диапазон в основном зависит от гидравлической характеристики датчика, определяемой его формой.

Измерители с искусственным магнитным полем могут быть однокомпонентными и двухкомпонентными. Первые должны быть ориентированы по потоку. Вторые состоят из обтекаемого корпуса (шар, диск, цилиндр) из изоляционного материала, катушки возбуждения магнитного поля и двух пар электродов, расположенных с противоположных сторон. В случае, когда поток совпадает с линией, проходящей через два расположенных противоположно электрода, наведенная на них ЭДС равна нулю, а на двух других имеет наибольшее значение. Если поток направлен под углом к осям координат, проходящим через электроды, то ЭДС, измеряемая обеими парами электродов, будет пропорциональна проекциям модуля скорости и прибор позволяет измерять мгновенные значения скорости.

Аппаратура подобного типа позволяет производить измерения средней скорости течения в диапазоне  $10^{-2}$ —10 м/с, мгновенной скорости в диапазоне  $10^{-3}$ — $4 \cdot 10^{-1}$  м/с в частотном диапазоне 1—40 Гц. При уровне собственных шумов в пределах  $8 \cdot 10^{-4}$  м/с погрешность измерения составляет 3 % при постоянной времени не более 1 с. Основным препятствием к применению измерителей скорости течений, использующих переменное магнитное поле, является сравнительно большое потребление энергии.

*Термодинамический метод* основан на зависимости теплообмена между измерительным зондом и средой от значения скорости течения. В этом случае используется либо теплопередача от зонда

к потоку (термоанемометр), либо от зонда к зонду через поток. Термодинамический метод используется в основном для исследования пульсационных характеристик течений. Между зондом, введенным в поток, и водной средой устанавливается теплообмен, интенсивность которого в основном зависит от скорости течения. Впервые эта зависимость была использована для прибора, измеряющего скорость ветра (термоанемометр Кинга, 1913 г.). Затем принцип теплообмена был использован для измерения скорости водного потока.

Наибольшее распространение в океанологической практике нашли проволочные, пленочные и гидрорезисторные термоанемометры. В качестве чувствительного элемента (ЧЭ) проволочного датчика используется тонкая (диаметром 2—10 мкм) нить из платины или сплава платины с иридием и вольфрамом. По принципу работы различают термоанемометры постоянного тока и постоянной температуры. В первых приборах электрический ток поддерживается постоянным, при этом температура, а следовательно, и электрическое сопротивление изменяются в зависимости от пульсационной скорости. Во вторых — постоянными остаются температура, а значит, и сопротивление, при этом изменяющейся величиной является электрический ток. Здесь ЧЭ можно включить в мостовую схему (рис. 8.6). Второй способ наиболее распространен в океанологии.

В поток помещают ЧЭ в виде нити и пропускают через него ток, нагревающий его. В потоке нить охлаждается в зависимости от скорости потока, что изменяет ее электрическое сопротивление. Пусть нить перпендикулярна потоку, жидкость несжимаема, разность температур нити бесконечно мала, число Прандтля постоянно, тогда количество тепла  $Q$ , теряемого нитью в единицу времени, оценивается уравнением Кинга

$$Q = L\Delta T(k + \sqrt{2\pi k\rho c_p U d}),$$

где  $L$  — длина нити;  $\Delta T = T_n - T$ ;  $T_n$  — температура нити;  $T$  — температура воды в потоке;  $k$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — плотность воды;  $c_p$  — коэффициент теплоемкости;  $d$  — диаметр нити. В безразмерной форме эта зависимость примет вид

$$Nu = A\sqrt{Re} + B,$$

где  $A$  и  $B$  — константы;  $Nu = Q/(\pi L k \Delta T)$  — число Нуссельта;  $Re = Upd/\mu$  — число Рейнольдса. Тепло, теряемое нитью, компенсируется электроподогревом, который контролируется и служит сред-

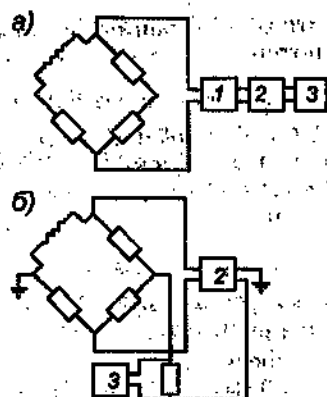


Рис. 8.6. Блок-схемы термоанемометров постоянного тока (а) и постоянной температуры (б). 1 — коммутатор; 2 — усилитель; 3 — регистратор.



ством измерения количества этого тепла. В практических расчетах потерю тепла находят из уравнения теплового равновесия

$$I_E^2 R = S \alpha \Delta T,$$

где  $I_E$  — ток через ЧЭ с сопротивлением  $R$ ;  $S$  — площадь поверхности охлаждаемого тела;  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи, являющийся функцией скорости потока, показатель теплового воздействия среды на тело. Для проволочных датчиков

$$\alpha = c(k_c/d)d^m(1/\nu^m)U,$$

где  $c$  и  $m$  — коэффициенты, зависящие от числа Рейнольдса и геометрических размеров датчиков;  $\nu$  — коэффициент молекулярной вязкости. Для скорости потока до 80 м/с  $k_c = 0,015-0,03$ ;  $c = 0,82$  и  $m = 0,64$ .

В современных термоанемометрах вместо проволоки широко используется платиновая пленка, наносимая тонким слоем на подложку из кварцевого стекла в виде конуса или клина. Протекаемый через пленку ток, поддерживаемый постоянным, нагревает ее и создает определенную разность температур между датчиком и окружающей средой. В воде эта разность обычно составляет 10–20 °C. Термоанемометры пленочного типа отличаются малым уровнем шумов. Среднеквадратический уровень шумов, приведенный к единице скорости, в диапазоне частот от 1 до 250 Гц составляет  $12 \cdot 10^{-6}$  м/с.

В другом типе термоанемометрического измерителя используется гидрорезисторный датчик, ЧЭ которого является объем воды, заключенный между центральным (точка диаметром 0,5 мм) и кольцевым (диаметр до 9 мм) электродами. Electroды расположены на полусферической поверхности и включены в схему измерительного генератора, обеспечивающего передачу через пространство между электродами мощности, достаточной для нагрева измерительного объема. Этот объем нагревается непрерывно, и изменение температуры некоторого эквивалентного объема воды вблизи точечного электрода вызывает соответствующее изменение электропроводимости. Изменение добротности измерительного генератора при флуктуациях электропроводимости объема воды между электродами модулирует амплитуду напряжения на выходе измерительного генератора. Таким образом, амплитудная модуляция этого напряжения содержит в себе информацию о скорости набегающего потока на ЧЭ датчика, включая пульсации набегающего потока. Минимальный размер пульсаций, измеряемых подобной аппаратурой, составляет около  $2 \cdot 10^{-3}$  м/с. Подобный датчик обладает широким частотным диапазоном (1–1000 Гц). Подобно термоанемометрическим измерителям с пленочным ЧЭ, гидрорезисторные датчики помимо пульсаций скорости потока одновременно могут измерять пульсации температуры и в меньшей степени пульсации электропроводимости.

С помощью термоанемометров при скоростях набегающего потока до  $3 \cdot 10^{-1}$  м/с удается получить чувствительность  $7 \cdot 10^{-4}$  м/с. Приборы подобного типа могут измерять скорости течений в широких

пределах от 0,01 до 0,15 м/с с погрешностью 2—5 %, а их информативность в принципе не зависит от средней скорости потока. К недостаткам термоанемометров следует отнести нелинейность градуировочной характеристики; влияние геометрических размеров датчиков на результаты измерений; зависимость результатов измерений от коррозии, обрастания, поляризационных эффектов и тому подобных причин, что снижает надежность термоанемометров и ограничивает иногда до нескольких часов время их использования.

**Акустические методы** измерения характеристик течений начали использоваться в океанологии где-то с середины 60-х годов. Акустические методы обладают высокой точностью и чувствительностью, что особенно важно при исследовании процессов турбулентности и малых скоростей течений. Большинство акустических методов основано на принципе измерения скорости прохождения ультразвука в морской воде, ибо скорость его распространения относительно прибора включает в себя и составляющую скорости движения исследуемой среды, вектор которой совпадает с вектором движения звуковой волны. Известно, что в турбулентном потоке, а это обычная картина для Мирового океана, существуют как флуктуации самой среды, так и, например, неоднородности температуры и различных концентраций. А температурные неоднородности, вызывающие колебания скорости звука, могут на порядок изменить измеряемую величину. Поэтому измерение скорости звука в одном направлении в океанологической практике из-за возникающих погрешностей малоэффективно. Это вызывает необходимость использовать приборы, измеряющие разность времени прохождения ультразвука между излучателем и приемником, движущихся в противоположных направлениях, чтобы свести к минимуму влияние колебаний скорости звука на точность измерения скорости потока. Для исследования мелкомасштабной турбулентности используется метод Доплера — регистрируется сдвиг частоты акустических колебаний за счет различных неоднородностей среды.

В измерителях подобного типа обычно применяют как минимум двух- или даже трехкомпонентные датчики скорости. Схемы устройства двухкомпонентных датчиков приведены на рис. 8.7. На рис. 8.7 а прибор ориентирован таким образом, что направление передачи акустического сигнала осуществляется параллельно направлению измеряемого сигнала (1). Один датчик (излучатель — (2), приемник — (3)) измеряет сумму скоростей звука и потока, а другой — разность между этими двумя скоростями. Но в этом случае возмож-

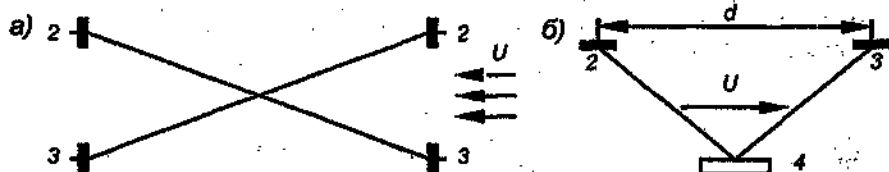


Рис. 8.7. Схемы устройства двухкомпонентных датчиков.

Усл. обозначения см. текст.

но несоответствие во времени задержки в измерительных схемах и изменение линейных размеров измерительных баз. Так, например, изменение базы между излучателем и приемником длиной 40 мм на  $10^{-3}$  мм эквивалентно изменению скорости течения на  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с, поэтому в измерительных приборах используются акустические системы с одной парой излучатель—приемник. В одном цикле измерений первый преобразователь является излучателем, а второй — приемником, в следующем — наоборот.

Экспериментальные исследования различных конструкций акустических датчиков скорости потока (по И. С. Ковчину) показали, что их выходные сигналы в основном соответствуют косинусной диаграмме направленности при угле между направлениями акустических сигналов и водного потока не менее  $25^\circ$ . Поэтому направление акустических сигналов принудительно ориентируют под углом  $45^\circ$  к направлению измеряемой составляющей скорости, для чего используют (рис. 8.7 б) акустические отражатели (4), например, из титанового сплава.

Подобная схема используется в конструкции акустического преобразователя измерителя течений АСМ-2. В качестве приемопередатчиков обычно используются пьезоэлектрические пластины. Так, в АСМ-2 они имеют диаметр 9,5 мм и высоту 1 мм. Пьезоэлектрические дисковые преобразователи размещены на концах литых алюминиевых кронштейнов на расстоянии  $d = 11$  мм. Собственный резонанс такой конструкции близок к несущей частоте  $f_{изл} = 1,605$  МГц.

Рассмотрим принцип действия подобной аппаратуры. Пусть  $c$  — скорость распространения ультразвука в неподвижной среде;  $U$  — скорость течения;  $T_1$  и  $T_2$  — время прохождения импульса по и против течения соответственно на расстоянии базы  $L$  между излучателем и приемником. Тогда

$$T_1 = L/(c + U), \quad T_2 = L/(c - U), \quad (8.2)$$

а разность времени прохождения сигнала в разных направлениях

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 2LU/(c^2 - U^2)$$

является функцией  $c$  и  $U$ . При  $c = \text{const}$  значения  $\Delta T$  однозначно определяют  $U$ . Но в реальных условиях скорость звука не постоянна и зависит от внешних факторов (температура, соленость морской воды и т. д.). Кроме того, для получения достаточной точности определения скорости потока необходимо измерять временные задержки с погрешностью не хуже  $\pm 10^{-9}$  с. Для избежания подобных явлений удобнее перейти от уравнения для приращения времени  $\Delta T$  к уравнению для частоты принимаемых ультразвуковых сигналов. Сообразуясь с (8.2), имеем

$$f_1 = 1/T_1 = (c + U)/L, \quad f_2 = 1/T_2 = (c - U)/L,$$

где  $f_1$  и  $f_2$  — частоты сигналов, распространившихся по и против течения соответственно. Отсюда

$$\Delta f = f_1 - f_2 = 2U/L. \quad (8.3)$$

Выражение (8.8) подчеркивает однозначную зависимость разности частот  $\Delta f$  от скорости потока  $U$  и лежит в основе частотного метода измерения скорости распространения ультразвука. Быстродействие прибора определяется необходимой точностью измерений. При отсчете разности частот через 1 с чувствительность измерений скорости составляет  $4 \cdot 10^{-2}$  м/с. Уменьшая дискретность опроса или увеличивая выходную частоту, можно повысить чувствительность. Объединив в одном устройстве несколько подобных измерителей, можно одновременно измерить различные составляющие скорости. Чувствительность  $f$ , достигнутая в этих приборах, составляет 200 кГц;  $df/dU = 300$  Гц/(см/с).

При использовании фазовых методов измеряется разность фаз (время прихода) двух встречных акустических импульсов. Если  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — разности фаз между опорным сигналом, снимаемым с генератора, и сигналами, прошедшими по течению и против него соответственно, то

$$\varphi_1 = \omega L / (c + U), \quad \varphi_2 = \omega L / (c - U),$$

или

$$\varphi_1 = \omega L / c + \omega UL / c^2, \quad \varphi_2 = \omega L / c - \omega UL / c^2,$$

а для разности фаз получим

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\omega UL / c^2,$$

где  $\omega = 2\pi f$ , т. е. чувствительность преобразователя, основанного на измерении скорости распространения ультразвука фазовым методом, пропорциональна частоте  $\omega$ .

Широко используются и акустические измерители характеристик течения, основанные на определении доплеровского сдвига частоты излученных колебаний. Эффект Доплера заключается в том, что отраженный от перемещающегося объема воды, содержащего в себе множество неоднородностей и различных включений, ультразвуковой сигнал имеет частоту, отличную от излучаемой. Доплеровские преобразователи включают в себя акустические излучатели (И) и приемники (П) с узконаправленными характеристиками. Различные варианты расположения излучателей и приемников в доплеровских преобразователях представлены на рис. 8.8. На пересечении акустических лучей и находится объем воды, от которого отраженный сигнал поступает на приемник. Считается, что рассеиватели в

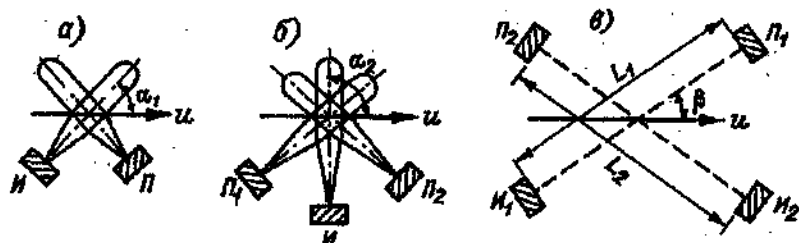


Рис. 8.8. Схемы доплеровских преобразователей.

рабочем объеме воды, включая планктон, взвеси и газовые пузырьки, соизмеримы или больше по размеру длины волны ( $\lambda = 0,15$  мм) и их число достаточно велико. Они стационарны относительно потока и перемещаются вместе с ним. Поэтому отраженный сигнал несет в себе информацию о скорости потока. Оптимальный диапазон частот в доплеровских измерителях лежит в полосе 2—10 МГц.

Затухание сигнала на частоте 10 МГц составляет 20 дБ/м. Использование высоких частот позволяет повысить разрешающую способность измерителя, а также формировать узконаправленные акустические лучи, используя малогабаритные излучатели. Рабочий объем воды располагается на расстоянии 30—60 см от излучателя, что исключает внесения искажений в рабочий объем воды корпусом прибора. Сигнал доплеровской частоты проявляется в виде амплитудной модуляции несущей частоты.

Рассматривая расположение датчиков, представленных на рис. 8.8 а, с учетом соотношения векторов скорости течения и распространения акустического сигнала, сообразуясь с выражением (8.3), можно записать

$$f_d = f' - f = [(c + U \cos \beta)/L_1 - (c - U \cos \beta)/L_2],$$

или

$$f_d = U(L_1 + L_2) \cos \beta / (L_1 L_2) - c(L_2 - L_1) / (L_1 L_2),$$

где  $f_d$  — доплеровский сдвиг частоты;  $f'$  — частота принимаемого сигнала;  $f$  — частота излучаемого сигнала;  $\beta$  — угол между вектором скорости потока и направлением излучатель—приемник. Для реально достижимой точности  $L_1 = L_2 = L$  и при незначительных изменениях с можно считать

$$c(L_2 - L_1) / (L_1 L_2) = 0.$$

Отсюда

$$f_d = (2U/L) \cos \beta,$$

т. е. скорость течения  $U$  однозначно определяется  $f_d$ .

Основным достоинством акустических преобразователей является их высокие чувствительность и точность, а также практическая безынерционность и надежность. Однако гидродинамический шум часто ограничивает применение акустических преобразователей, особенно если пространственный масштаб измеряемых неоднородностей поля скорости соизмерим с масштабом турбулентных искажений, возникающих при обтекании измерителя. Акустические преобразователи позволяют измерять скорость течения в диапазоне  $10^{-2}$ —5 м/с; нелинейность во всем диапазоне составляет около 1 %. Так как преобразователи практически безынерционны, они могут быть использованы для измерения как средних, так и пульсационных скоростей течения.

*Оптические методы* измерения скорости течения подразделяются на доплеровский и фазовый. Для измерения скорости потока и ее изменений во времени используется как искусственное, в виде лазерных или обычных электрических источников света, так и собственное излучение.

Доплеровский метод (см. рис. 8.8 а и б) дает возможность получить частотное разрешение, что позволяет измерять скорости порядка мм/с. Он описывается уравнением

$$f' = f [\sqrt{1 - U^2/c^2} / (1 - U/c)] n \cos \alpha.$$

После преобразования с учетом малости величин получим

$$f' = f(U/c) n \cos \alpha,$$

где  $f$  и  $f'$  — частоты излучения и принимаемого сигнала соответственно;  $U$  — скорость потока;  $c$  — скорость света;  $n$  — показатель преломления света;  $\alpha$  — угол между вектором скорости и линией наблюдения.

Фазовый оптический метод измерения скорости течений включает в себя известный принцип сдвига интерференционной картины. Разность хода  $\Delta L$  в длинах волн  $\lambda$  определяется как

$$\Delta L = 2LUx_L n^2 c / [\lambda(c^2 - n^2 U^2)] \approx 2LU(n^2 - 1) / (\lambda c),$$

где  $L$  — длина оптической базы;  $x_L = 1 - 1/n^2$ ;  $n$  — коэффициент преломления света.

Особенностью оптических измерителей является большая чувствительность к изменениям коэффициента преломления света, а значит, и к плотности морской воды. Оптические измерители, используя свою высокую частоту излучения, в принципе могут иметь достаточно высокие разрешающую способность и чувствительность, но относительная погрешность и различные паразитные эффекты аналогичны акустическим измерителям. Кроме того, в них еще возникают большие трудности регистрации и анализа изменяющихся по амплитуде доплеровских сигналов излучения. Следует заметить, что частотный диапазон в спектре течений оптических измерителей оказывается практически неограниченным.

*Вихревые методы* измерения скорости течений основаны на регистрации последовательности вихрей, возникающих при обтекании различных тел в потоке жидкости, так называемых дорожек Кармана. Регулярные вихри образуются в области чисел Рейнольдса 60—5000, при этом частота образования вихрей  $f$  прямо пропорциональна скорости течений

$$f = (Sh/d)U,$$

где  $d$  — диаметр обтекаемого тела;  $Sh$  — число Струала. Для  $Re < 60$  течение позади тела ламинарное, для  $Re > 5000$  — турбулентное.

Для измерения вихреобразований используют термодатчики и датчики давления. В последнее время широко используется метод модуляции вихрями акустического и лазерного лучей. К недостаткам подобных измерителей относятся довольно высокий нижний предел применимости 5—10 см/с, а также их критичность к горизонтальному положению, так как частота образования вихрей зависит от вращения измерителя в горизонтальной плоскости, что может занижать результаты измерений на 20—25 %.

*Метод меток* основан на измерении времени переноса потоком определенного, обычно малого, объема метки с помощью соответствующей

приборов. Метки могут быть как искусственными, так и естественно существующими в потоке. Они могут состоять из микрочастиц (атомов, молекул или ионов) и макрочастиц, взвешенных в исследуемой среде. Метка может отличаться от окружающей среды температурой, степенью ионизации, зарядом, плотностью, светимостью, коэффициентом преломления, поглощательной способностью, радиоактивностью и т. п.

Погрешность измерения скорости методом меток складывается из погрешности определения времени и пути прохождения меток и погрешности, возникающей в случае отличия скорости движения метки от скорости потока. Если используются искусственные метки, к этим составляющим добавляется погрешность за счет искажения потока самой меткой. С учетом того, что две первые погрешности сравнительно малы, а третью можно надежно оценить, метод меток довольно перспективен для создания образцовых средств измерения характеристик скорости течения.

*Электрохимический метод* основан на воздействии потока морской воды, смывающего пузырьки газа, возникающие в процессе электролиза. При этом уменьшается и сопротивление электрической цепи. На входные характеристики подобной системы оказывает влияние изменение формы электродов, участвующих в реакции, и диафрагм, окружающих электроды. Эта зависимость дает возможность проводить измерения направления вектора скорости течения при использовании множества электродов. Постоянная времени данных электрохимических ячеек составляет обычно секунды и десятки секунд и в значительной мере зависит от скорости потока. На погрешность измерений оказывают влияние температура, соленость морской воды и гидростатическое давление.

*Неконтактные методы* дают возможность получать практически синхронную картину распределения течений на больших акваториях за короткий период времени. Использование аэрокосмических методов в сочетании с судовыми наблюдениями и наблюдениями на АБС позволяет получить наиболее полную картину течений и их изменений во времени и пространстве. При изучении характеристик течений аэрокосмическими методами используются разные косвенные методы: от регистрации положения температурных фронтов, уклона уровня, полей цветности до маршрутных аэрофотосъемок положения различных видов поплавков с последующим фотограмметрическим вычислением векторов течений и получения информации с дрейфтеров.

### **8.3. Измерение направления течений**

В океанологической практике для определения ориентации измерителей течения в пространстве обычно используют магнитный метод, базирующийся на измерении угла между направлением магнитного меридиана и направлением горизонтальной составляющей вектора скорости течения. Угол поворота компасной картушки относительно азимутального кольца фиксируется с помощью механических, электромеханических, потенциометрических, феррозондовых,

фотоэлектрических и других преобразователей, способных модулировать значение угла поворота в аналоговый или цифровой код.

В этом случае, особенно при использовании однокомпонентных датчиков скорости потока, возникает необходимость ориентирования корпуса прибора с находящимся в нем датчиком направления по потоку. Для достижения подобного эффекта в конструкции таких приборов предусматривается установка рулей и направляющих плоскостей, площади которых зависят от необходимых постоянной времени и чувствительности измерителя к изменению направления потока. Но при таком определении направления течения значительные методические погрешности могут возникнуть из-за неточности установки корпуса прибора по потоку. Гидродинамическую силу  $F$  (по И. С. Ковчину), воздействие которой на рули разворачивает прибор, можно определить как

$$F = 0,5U^2 \rho S_p C_p \sin \varphi,$$

где  $\rho$  — плотность воды;  $S_p$  — площадь рулей;  $C_p$  — коэффициент лобового сопротивления рулей;  $\varphi$  — угол между направлением течения и диаметральной плоскостью корпуса прибора. Эта зависимость показывает, что при уменьшении угла  $\varphi$  гидродинамическая сила уменьшается по синусоидальному закону (не линейно), что в результате может привести к возникновению зоны нечувствительности к направлению течения. Возникающая при этом погрешность определения направления достигает довольно больших значений. Однако благодаря своей простоте данный способ до сих пор широко используется во многих измерителях.

В некоторых измерителях скорости потока, особенно в тех, что не требуют ориентирования по потоку (ротатор Савониуса, крест Робинсона), для определения направления, как правило, используется не связанный жестко с корпусом флюгерный датчик. По положению такой флюгарки судят об угле ориентации вектора течения  $\varphi$  относительно приборной системы координат, положение которой в пространстве определяется магнитным компасом. Поскольку масса флюгарки гораздо меньше массы собственно прибора, погрешность флюгарного датчика будет не более  $\pm(1-2)^\circ$ . Обычно передача информации от флюгарки к самому прибору осуществляется с помощью магнитной муфты. Следует отметить, что в этом случае могут возникнуть дополнительные погрешности, вызванные несогласованностью характеристик флюгарки с таковыми датчика скорости, с рулевым оперением корпуса и т. п.

В последнее время все более широкое применение находят измерители с двухкомпонентными датчиками скорости течения из-за своих преимуществ в отношении точности измерения направления течения. В этом случае угол ориентации  $\varphi$  вектора скорости потока  $U$  относительно приборной системы координат однозначно определяется через отношение измеренных ортогональных компонентов  $U_1$  и  $U_2$  этого вектора как

$$\varphi = \arctg(U_2/U_1),$$



если угол  $\varphi$  отсчитывается относительно направления, совпадающего с направлением компонента  $U_1$ . Но и здесь положение приборной системы относительно магнитного меридиана измеряется с помощью магнитных компасов.

В океанологической практике наибольшее распространение нашли механические и феррозондовые магнитные компасы — датчики азимутального угла расположения корпуса прибора. В качестве механических компасов, как правило, используются потенциометрические компасы и компасы с кодовыми масками. Первые преобразуют значение азимутального угла в аналоговый электрический сигнал, а вторые — в цифровой код.

Потенциометрический компас представляет собой проволоочный реохорд, скользящий электрод которого укреплен на картушке и в момент измерения с помощью соленоида прижимается к реохорду. При использовании потенциометрического преобразователя компасную картушку можно также поместить в раствор электролита. Такой компас состоит из котелка, заполненного электролитом (спиртовой раствор с добавкой солей хлористого натрия и формалина), и плавающей внутри котелка компасной картушки. Жидкостный преобразователь угла поворота картушки в электрический сигнал является линейным потенциометром, т. е. угловое положение картушки будет пропорционально выходному сигналу датчика. Недостатком приборов первого типа является недостаточная надежность механического контакта скользящего электрода с проволоочным реохордом, деформация иглы картушки и значительное энергопотребление, а второго типа — трудность герметизации котелка и наличие дополнительной температурной погрешности.

В другом типе механических компасов используются различные кодирующие маски с оптическим съемом информации. Ось магнитной картушки вращается в подшипниках, установленных на раме на кардановом подвесе, изготовленной из немагнитного материала. На раме также закреплены осветитель и светочувствительные элементы. Вся система помещена в герметичный кожух из немагнитного материала, заполненный чистой и прозрачной жидкостью. Кодирующая маска обычно изготавливается в виде тонкостенного барабана или диска. На нее наносятся разрядные дорожки в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных сегментных участков, число светочувствительных элементов в которых соответствует числу разрядных дорожек. Кодирование осуществляется с помощью одного из помехозащищенных кодов (чаще всего 8-разрядного кода Грея) как по линейному закону, так и в любой функции. В последнем случае на раме устанавливается вторая линейка светочувствительных элементов перпендикулярно первой. Свет от осветителя, проходя через прозрачные сегменты разрядных дорожек, воздействует на соответствующие светочувствительные элементы. Получаемый при измерении закодированный сигнал однозначно соответствует положению картушки относительно корпуса прибора. Разрешающая способность подобных систем принципиально определяется числом разрядных дорожек. Существенным недостат-

ком компасов с оптическим съемом информации является высокое энергопотребление.

В последнее время для измерения направления вектора скорости отмечено использование феррозондовых датчиков магнитного меридиана, учитывающих изменение индуктивности нескольких взаимно перпендикулярных обмоток, расположенных на сердечнике из магнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (обычно пермаллой), под действием магнитного поля Земли. Действие магнитного поля Земли способствует возникновению пропорциональной ему второй гармоники, которую можно измерить и преобразовать в кодовый сигнал. Одна из этих обмоток вырабатывает сигнал, пропорциональный синусу, а другая — косинусу угла поворота датчика относительно магнитного меридиана. Точность измерения при горизонтальном положении подобного прибора около  $2^\circ$  при разрешающей способности  $0,1^\circ$ .

Разрешающая способность по углу потенциометрических компасов составляет  $0,5-2^\circ$ , а погрешность  $\pm(3-10)^\circ$ . Дисковые компасы с 8-разрядным кодом Грея позволяют обеспечить разрешающую способность  $\pm 1^\circ$  при точности измерений до  $\pm 8^\circ$ .

#### 8.4. Аппаратура для измерения характеристик течения

Способы и приборы для наблюдений за течениями родились из практики судоходства. Первыми «приборами» являлись свободно плавающие предметы и даже сами суда. Так, первое обстоятельное (по мнению Ю. М. Шокальского) наблюдение за течениями было выполнено Х. Колумбом во время его первого плавания 13 сентября 1492 г. В штиль по отклонению лота, опущенного достаточно глубоко в воду, он заметил, что судно несет течением на юго-запад. Лот служил здесь только «неподвижной точкой», относительно которой наблюдалось «движение свободного поплавка».

Один из первых приборов для измерения характеристик течений предложил М. В. Ломоносов. Устройство, расположенное на борту судна, лежащего в дрейфе, позволяло определять скорость течения по степени отклонения стрелки, фиксируемого на двух взаимно перпендикулярных полукруглых шкалах. К подвижному концу стрелки с помощью веревки крепился шар, погружаемый достаточно глубоко в воду, так как считалось, что с глубиной течение в значительной степени уменьшается. При наличии поверхностного течения судно дрейфует, веревка натягивается, стрелка отклоняется от нормали и по степени ее отклонения можно судить о скорости и направлении течения. Тогда же Ломоносов указал на необходимость тарировки прибора. Это, вероятно, впервые высказанное требование по отношению к океанографическим приборам.

В 1905 г. Экман сконструировал вертушку, позволяющую измерять характеристики течений не только на поверхности, но и на глубинах. Усовершенствованная позднее Мерцем, она получила назва-

ние «вертушка Экмана—Мерца». Претерпев небольшие модернизации, вертушка использовалась до последнего времени.

Широкое распространение в океанологической практике, особенно при исследовании течений в поверхностном слое моря, нашел поплавокный метод. Следует отметить, что на используемую здесь аппаратуру большое влияние, кроме течения, оказывают ветер и волнение, вносящие значительные погрешности в измерения. Поэтому поправки должны удовлетворять основному требованию — площадь вертикального сечения надводной части поплавка и площадь сечения подводной части должны находиться в отношении 1:100 и меньше. Для массового разбрасывания в качестве поплавков можно использовать полиэтиленовые конверты, плавающие на поверхности. Сведения о пущенных конвертах регистрируют в журналах. Первичная обработка результатов наблюдений с помощью конвертов производится на схематической карте, на которую наносят траектории движения конвертов. Точки, в которых отмечены конверты, соединяются прямыми линиями. Снятое с карты расстояние, пройденное конвертами, делят на время и получают значение средней скорости.

Для этой же цели используются двойные привязные поплавки (рис. 8.9 а). Их прообразом были двойные поплавки, которыми пользовался еще Леонардо Да Винчи. Поплавки применяют при скорости ветра до 6 м/с, волнении до 2—3 баллов и при скорости течения более 0,1 м/с с судна, стоящего на якорь. Двойные привязные

поплавки имеют форму цилиндрических сосудов диаметром 20—30 см и высотой 40—50 см.

Верхняя часть верхнего сосуда имеет конусообразную форму с узким горлом, закрываемым пробкой. Сосуд снабжен двумя проволоочными дужками, одна из которых прикреплена к верхнему краю цилиндра, а другая — к нижнему. К последней тросом подвязана дужка нижнего цилиндра так, чтобы расстояние от верха цилиндрической части верхнего сосуда до середины нижнего сосуда было равным 1 м. К верхней дужке первого цилиндра крепится линия длиной до 200 м с подвязанными к нему через каждые 10 м плавучестями. Рабочая часть линия маркируется через каждый метр. Для придания всей системе надлежащей плавучести нижний сосуд загружается балластом с таким расчетом, чтобы верхний сосуд погружался в воду до основания конуса. Скорость течения определяется по времени, которое требуется на вытравливание линия определенной длины, а направление —

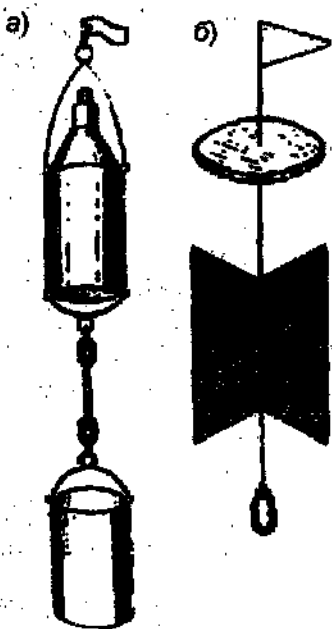


Рис. 8.9. Двойные привязные (а) и свободный (б) поплавок.

компасом по углу между направлением на поплавок и диаметральной плоскостью судна.

Поверхностные течения можно также измерять с помощью поплавков, пущенных в свободный дрейф (рис. 8.9 б). Наблюдения за перемещением поплавков производятся визуально, с помощью судовых навигационных средств, судовых и береговых радиолокаторов, а также спутниковых систем. В этом случае применяют дрейфующие вежи (дрифтеры), состоящие из буя, подводного паруса, радиопередающей аппаратуры и мачты с укрепленными на ней антенной и угловым отражателем.

В ЦКБ ГМП (г. Обнинск) была разработана *гидрометеорологическая буйковая дрейфующая станция* (дрифтер) с передачей получаемой информации по космическим каналам связи (КУРС, АРГОС, ГОНЕЦ) не менее восьми раз в сутки. Пункты приема информации расположены в Москве, Архангельске, Находке. Дрифтер предназначен для получения оперативной гидрометинформации в любом районе Мирового океана.

#### Технические характеристики дрифтера

|                              |               |          |
|------------------------------|---------------|----------|
| Канал температуры воздуха:   | диапазон, °С  | -20...40 |
|                              | точность, °С  | ±0,1     |
| Канал температуры воды:      | диапазон, °С  | -2...32  |
|                              | точность, °С  | ±0,1     |
| Канал атмосферного давления: | диапазон, ГПа | 840—1070 |
|                              | точность, ГПа | ±1       |
| Канал скорости ветра:        | диапазон, м/с | 1—50     |
|                              | точность, м/с | ±2       |
| Канал направления ветра:     | диапазон, ... | 0—360    |
|                              | точность, ... | ±10      |

Характеристики течения определяются по координатам нахождения дрифтера. Точность определения координат местоположения буя не хуже 3,5 км. Корпус несущего буя дрифтера высотой 3,7 м и наибольшим диаметром 0,8 м изготовлен из коррозионностойкого алюминия, снабжен дополнительной плавучестью из ферропластика и мачтой из композиционного материала. Масса дрифтера — 135 кг. Набор литиевых батарей обеспечивает автономность работы дрифтера не менее 18 месяцев.

Подобные системы широко используются для нужд Всемирной службы погоды. Так, например, только в Южной Атлантике в 1995 г. было запущено 45 буюв, а в 1996 г. уже 70.

Поплавки нейтральной плавучести используются для измерения характеристик течения на глубине. Сваллоу впервые в мире использовал поплавок подобного типа, изготовленный из двух труб алюминиевого сплава длиной по 3 м. В одной трубе размещались передатчик и блок питания, а вторая труба обеспечивала плавучесть поплавка, способного работать на глубинах до 5000 м. Передатчик устройства работал на частоте 10 кГц. Методика работы с поплавком Сваллоу заключается в следующем. Перед началом работ на предполагаемом горизонте наблюдений определяется плотность воды путем

измерений там температуры и солености. Регулировка плавучести поплавка нейтральной плавучести осуществляется в соответствии с полученной плотностью, после чего поплавок опускается в воду.

Регистрация ультразвукового сигнала производится парой гидрофонов, опускаемых с носа и кормы судна, что позволяет определить скорость и направление перемещения поплавка в потоке на основе разности во времени прихода сигнала, т. е. по расстоянию от поплавка до гидрофонов. Сигналы, принимаемые гидрофонами, регистрируются двухлучевым осциллографом, что позволяет определять запаздывание этих сигналов во времени. По результатам этой регистрации строится полярная диаграмма запаздывания в зависимости от ориентации судна, которая имеет острый минимум в случае, когда линия, соединяющая гидрофоны, нормальна к направлению на поплавок. Подобные измерения повторяются при каждом изменении координат судна. Местоположение судна определяется с помощью реперного буя, координаты которого известны.

В ИО РАН разработан *поплавок нейтральной плавучести*, предназначенный для измерения характеристик течений с малотоннажных судов на глубинах до 1000 м. Корпус поплавка представляет собой две полусферы с внешним диаметром 207 мм, толщиной стенок 9 мм и с герметичным фланцевым соединением диаметром 250 мм и толщиной каждая по 11 мм. Внутри сферы расположены электронная схема акустического маяка и блок питания. В днище нижней полусферы вклеен изнутри двухслойный пьезокристаллический элемент, который служит излучателем акустических сигналов. Автономность работы поплавка — 1 неделя.

Для выведения поплавка на нужную изопикну к нему подвешивают на кольце из магниевого сплава балласт. При погружении в морскую воду магний начинает растворяться, поэтому толщина кольца выбирается в зависимости от заданной автономности, после чего балласт обрасывается и поплавок всплывает. Слежение за поплавком осуществляется с помощью портативной направленной акустической антенны АО-71М и приемного устройства ПГРК «Латвия». Антенна опускается с борта судна на штанге на глубину, достаточную для кругового обзора под днищем судна. Верхняя часть штанги снабжена поворотным устройством и компасом для определения направления антенны. Дальность акустической связи до 3 миль. Определение азимута на поплавок производится путем слухового контроля с точностью  $\pm 5^\circ$ . Местоположение поплавка относительно судна определяется путем взятия крьюс-целинга.

Своеобразным измерителем профиля течения по глубине является система *однообразного использования «Гидробалл»* (поплавок-интегратор), состоящая из зондирующего устройства сферической формы, обрасываемого с судна, и бортового устройства гидроакустического слежения за движением зонда. Горизонтальное смещение зонда при его свободном падении зависит от профиля скорости потока воды. Бортовое устройство системы определяет расстояние от судна до зонда, глубину погружения зонда и направление смещения зонда относительно судна.

Система работает до глубины 500 м при возможном расстоянии между судном и зондом до 1500 м. При скоростях течения более 0,8 м/с погрешность измерения скорости составляет  $\pm 4 \cdot 10^{-2}$  м/с, направления  $\pm 10\%$ . Скорость падения зонда примерно 0,86 м/с, общее время измерения до глубины 500 м — 38 мин, частота замеров — 1 с. Зонд также обеспечивает измерение и передачу данных о температуре воды в диапазоне от  $-3$  до  $37^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,25^\circ\text{C}$ .

В океанологической практике для исследования придонных течений используют донные поплавки Р. И. Грейга и П. М. Вудхеда, обладающие небольшой отрицательной плавучестью. Поплавок Грейга представляет собой квадратную пластмассовую пластинку с отверстием в центре, через которое пропущен эластичный шнур с медным грузом на конце. Касаясь грузом дна, поплавок перемещается по течению. Поплавок Вудхеда грибообразной формы изготовлен из полиэтилена, также снабжен шнуром с грузом. Донные поплавки запускаются с расчетом на то, что при ловле рыбы они могут попасть в орудия лова (при измерениях в открытом море), а при прибрежных наблюдениях могут быть выброшены на берег. Анализ путей и времени перемещения поплавков позволяет судить о характеристиках течения. К недостаткам данного метода следует отнести наличие парусности поплавков, что может изменить направление их движения, и весьма небольшой процент возвращения поплавков.

Наибольшее распространение в океанологической практике нашли непосредственные измерители характеристик течений, чаще всего использующие вертупечный метод. И конечно же, естественней будет начать с наиболее широко используемых у нас в стране до последнего времени вертупки морской модернизированной (ВММ) и первого отечественного серийного образца автономных измерителей течений БПВ-2 — самописца Ю. К. Алексеева (буквопечатающая вертупка).

*Измерители течений типа ВММ* — приборы разового действия, т. е. после получения одного измерения на горизонте наблюдений вертупка поднимается на борт судна для снятия отчетов и перезарядки.

Вертупка морская модернизированная (рис. 8.10) состоит из легкой рамы с вертикальной осью подвеса, обеспечивающей возможность вращения вокруг этой оси. На верхнем конце оси неподвижно укреплен направляющий стержень, имеющий в верхней части прорезь для троса лебедки, в огон которого пропускается винт с барашком. На нижнем конце оси имеется ушко для подвеса поддона, уменьшающего снос прибора течением. На двух консолях рамы закреплен защитный кожух лопастного винта в виде кольца, предохраняющий винт от механических повреждений при работе с вертупкой. Лопастной винт укреплен на трубчатой оси со ступицей, к которой прикреплены четыре спицы с лопастями, расположенными под углом  $45^\circ$  к оси. Ось лопастного винта имеет червяк, с которым с помощью переключающего механизма сцепляется шестерня счетчика оборотов. Переключающий механизм, приводимый в действие посыльными грузиками, вводит шестерню счетчика оборотов в зацепление с червяком лопастного винта в том случае, когда ВММ находится на

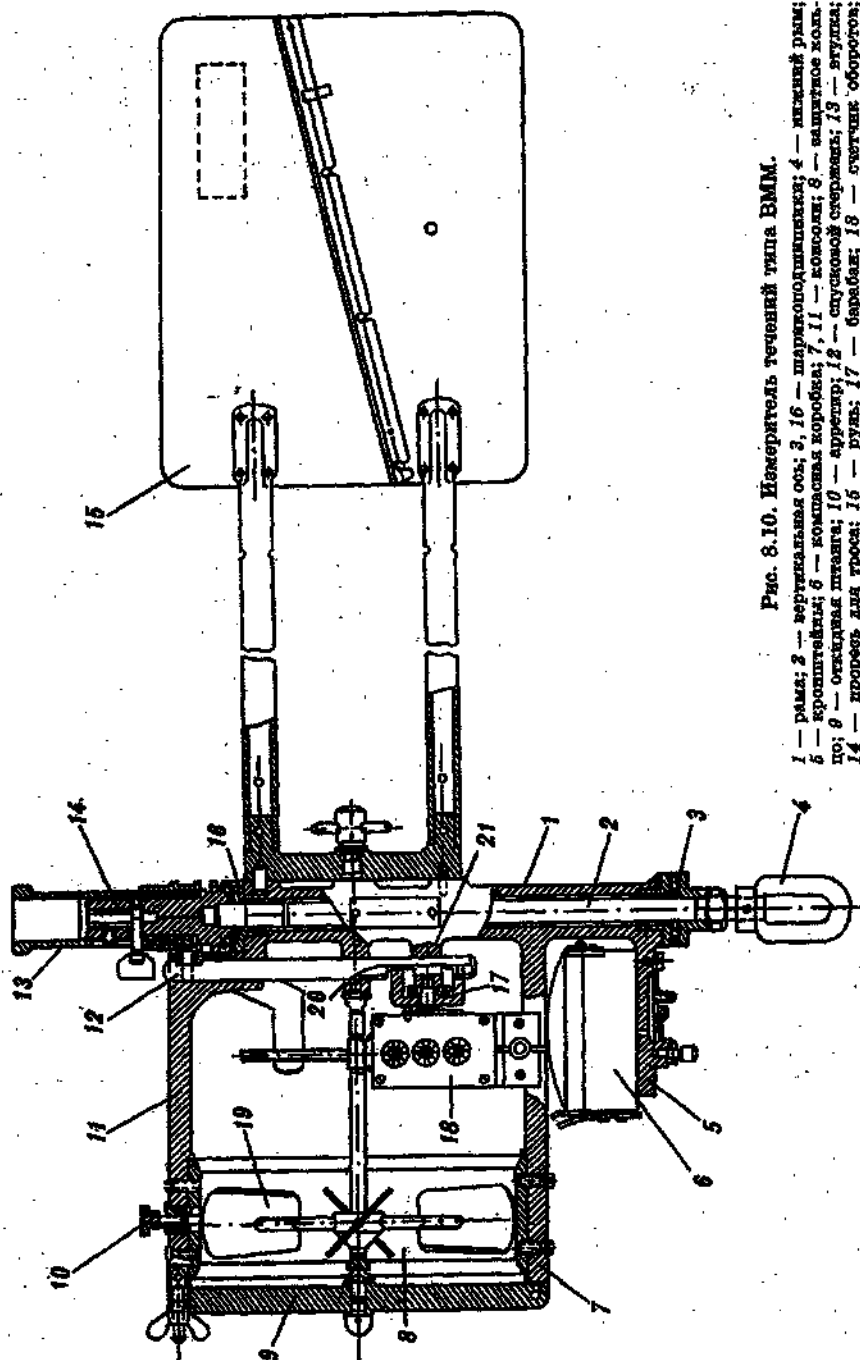


Рис. 8.10. Измеритель течений типа ВММ.

1 — рама; 2 — вертикальная ось; 3, 16 — шарикоподшипники; 4 — нижний рычаг; 5 — кронштейн; 6 — комбинированная рама; 7, 11 — колеса; 8 — выходящее жон-по; 9 — окладная планка; 10 — арретир; 12 — ступенчатый стержень; 13 — ступица; 14 — прорезь для троса; 15 — руль; 17 — барабан; 18 — счетчик оборотов; 19 — лопастной винт; 20, 21 — тормозная рама.

заданном горизонте, а первый посыльный грузик, опущенный с судна, ударяет по муфте вертикальной оси, при этом срабатывает спусковой механизм, включающий счетчик оборотов.

Через определенный промежуток времени, зависящий от скорости течения, по тросу посылается второй посыльный грузик, выключающий счетчик оборотов, который заключен в прямоугольную коробку и состоит из трех шестеренок со стрелками-указателями (по верхнему циферблату отсчитываются единицы и десятки оборотов, по среднему — сотни, а по нижнему — тысячи оборотов). Над счетчиком оборотов расположена трубка-магазин с запасом латунных шариков диаметром 3 мм (20—23 шт.). Нижний шарик помещается в одну из трех выемок, находящихся друг от друга под углом 120° на диске, укрепленном на оси верхней шестеренки счетчика оборотов. По счетчику оборотов получают данные о скорости течения в оборотах в секунду, а затем по градуировочной кривой переходят к скорости в см/с.

Под счетчиком оборотов на кронштейне укреплена компасная коробка. Каждый раз, когда при вращении верхней шестеренки счетчика оборотов и диска под концом трубки-магазина оказывается выемка, в нее попадает один шарик и переносится к отверстию нижней трубки, а из трубки — в компасную коробку, в верхней, открывающейся, крышке которой есть отверстие для прохода шариков. В центре компасной коробки на игле расположена магнитная стрелка, северный конец которой имеет желоб, а в верхней, центральной, части стрелки находится чашечка со сливом в желоб, расположенная под отверстием. Через каждые 33,3 оборота пропеллера в компасную коробку попадает один шарик и по желобу скатывается в один из секторов компасной коробки, разделенной перегородками на 36 секторов по 10°, пронумерованных от 0 до 35. Таким образом, по окончании наблюдений на палубе можно видеть, какие секторы компасной коробки в процессе измерений находились под северным концом магнитной стрелки, т. е. куда было направлено течение. К задней части латунной рамы крепится руль, имеющий съемные наклонные пластины. Лопастной винт в виде пропеллера является наиболее рациональной конструкцией ввиду уменьшения площади лопастей вблизи ступицы. Эта же конструкция является наиболее простой с технологической точки зрения.

*Самописец течений ВПВ-2* (рис. 8.11) — прибор механического типа, предназначенный для ав-

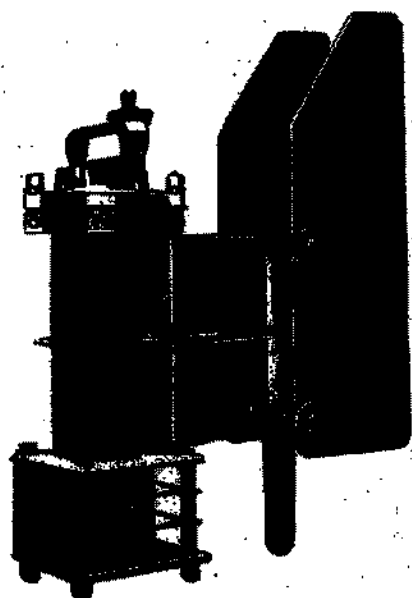


Рис. 8.11. Самописец течений ВПВ-2.



томатического измерения и регистрации скорости и направления на глубинах до 1200 м, может использоваться как с борта судна, так и на автономных буйковых станциях. Регистрация получаемой информации (скорость в см/с, направление в десятках градусов) осуществляется на бумажной ленте, запаса которой хватает на 1440 отпечатков скорости и направления течения. Датчик скорости — четырехлопастной винт с вертикальной осью вращения и экраном, помещенным в нижней части измерителя. Вращение лопастного винта внутрь корпуса прибора передается с помощью магнитной муфты. Направление течения (ориентация прибора по потоку) измеряется магнитным компасом. Для установки по потоку самописец снабжен двумя развитыми рулевыми пластинами. Дискретность измерений задается заранее с помощью специальных минутных дисков и может быть 5, 10, 15, 20, 30 и 60 мин. Автономность работы прибора при использовании 60-минутного диска — 60 суток.

Имеющиеся модификации измерителей типа БПВ обладают некоторыми различиями в конструкции корпуса прибора; кроме того, БПВ-2р рассчитан на глубины до 250 м и снабжен чашечным анемометрическим датчиком скорости также с вертикальной осью; ЭСТ (электронифицированный самописец течений) аналогичен БПВ-2, но снабжен емкими катушками для бумажной ленты, электродвигателем, электрочасами и батареей питания вместо стальной пружины патефонного типа и обычных часов БПВ, что позволяет увеличить автономность работы прибора до одного года; ЭСТ-А подобен ЭСТ, но имеет датчик скорости пропеллерного типа с горизонтальной осью вращения.

Регистрация информации о скорости и направлении течения осуществляется следующим образом. Через заранее заданные промежутки времени часовой механизм включает прибор в работу. При этом вращение лопастного винта через магнитную муфту и систему шестеренок начинает передаваться диску скорости, угол поворота которого пропорционален числу оборотов лопастного винта.

Одновременно при этом высвобождается магнитная катушка компаса и устанавливается по магнитному меридиану. Через определенный промежуток времени (время экспозиции  $190 \pm 10$  с) — индивидуальный для каждого прибора — стопорится катушка компаса и на бумажной ленте отпечатываются значения направления и скорости течения, а диск скорости возвращается в начальное положение. Следовательно, приборы типа БПВ измеряют мгновенное значение направления и осредненный за время экспозиции модуль вектора скорости течения. Диапазон измерения скорости 0,02—1,48 м/с. Масса БПВ-2 — 49 кг, БПВ-2р — 29 кг.

Результаты сравнительного эксперимента с лучшей стороны охарактеризовали пропеллер (ЭСТ-А), обеспечивающий наименьшие погрешности за счет волнового компонента скорости и вертикальных колебаний. Экранированные датчики занижают измеренную скорость из-за рыскания прибора. Нерезервированный датчик (БПВ-2р) существенно завышает измеренную скорость за счет вертикальных колебаний и волнового компонента скорости.

Продувка воздушным потоком различных типов датчиков в двух противоположных направлениях (под углом 0 и 180° к диаметральной плоскости самописцев) показала следующее:

- реверсивным (с наименьшими погрешностями) является только датчик самописца ЭСТ-А;

- БПВ-2р по сумме фронтального и противоположно направленного потоков показал удвоенную скорость, что характеризует нереверсивные датчики;

- БПВ-2 не может считаться реверсивным датчиком, так как исключает примерно 40 % фронтального потока;

- датчик прибора ЭСТ также не является реверсивным, так как регистрирует только фронтальную половину знакопеременного потока и не регистрирует поток противоположного направления.

*Долговременный измеритель течения и температуры МГИ 1301-ДИСК (СКТБ МГИ Украины) — цифровая многоканальная система с записью получаемой информации на магнитную ленту (рис. 8.12). На верхней крышке корпуса прибора цилиндрической формы массой 55,9 кг расположены датчики скорости течения и температуры (медный ПТС). Выпускаются три модификации прибора: в титановом корпусе для глубин до 6000 м, в керамическом — до 3000 м и в стеклянном — до 1500 м.*

Датчик скорости течения — четырехлопастной пропеллер, лопасти которого расположены под углом 45° к продольной оси и закреплены в обтекатель. Для преобразования числа оборотов лопастного винта в

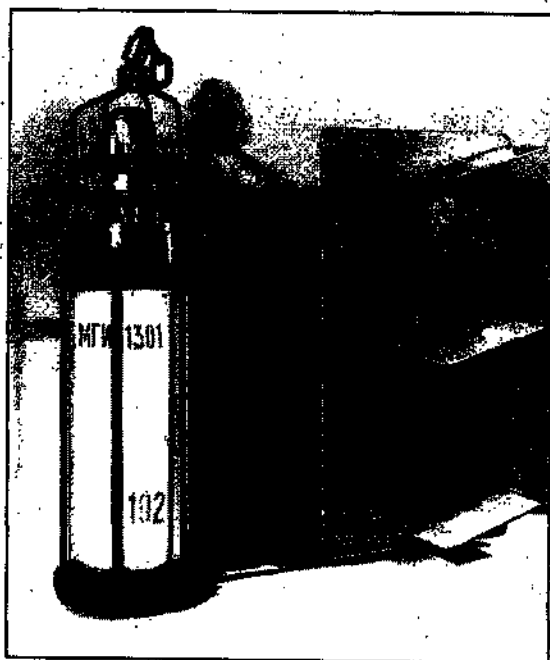


Рис. 8.12. Измеритель  
МГИ 1301-ДИСК.

электрический сигнал в обод пропеллера впрыснуты 12 маленьких магнитов, а в 2—3 см от них, в крышке корпуса прибора, размещены магнитодиоды, включенные в мостовую схему с усилителем.

Направление течения определяется магнитным компасом на кардановом подвесе по положению корпуса прибора, который ориентируется в потоке с помощью одной или двух рулевых пластин. В приборе используется потенциометрический тип компаса, картушка которого в момент измерений с помощью соленоида прижимается к обмотке кругового потенциометра.

Сигналы с датчиков скорости, направления и температуры подсчитываются счетно-импульсной схемой за время экспозиции, равное 4 или 8 с, а полученные результаты записываются по каждому значению 8-разрядным кодом с дискретностью 0,1; 0,2; 1,0; 5 и 10 мин при общем числе циклов измерений до 1250. Дискретность измерений задается заранее.

Скорость течения измеряется в двух диапазонах: 0,025—1,75 м/с (чувствительность 0,007 м/с, время экспозиции 4 с) и 0,025—0,87 м/с (чувствительность 0,0035 м/с, время экспозиции 8 с). Погрешность измерения направления составляет  $\pm 5^\circ$ , чувствительность  $1,8^\circ$ , время осреднения направления 2—2,5 с. Температура воды измеряется в диапазоне  $-2...32^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,15^\circ\text{C}$ . В качестве источника питания используются восемь аккумуляторов типа КНТК-10. Автономность работы измерителя при дискретности 10 мин не менее 80 суток.

Автономный измеритель течений и температуры «Поток» (ИО РАН) имеет цилиндрический корпус с рулевыми пластинами. Датчиком скорости является пропеллер с горизонтальной осью вращения, установленный на нижнем основании корпуса прибора в обтекателе. Вращение пропеллера через открытую коническую муфту с коэффициентом 2:1 передается к вертикальному штоку, а затем через магнитную муфту внутрь корпуса прибора. В измерителе используется векторное осреднение показаний. Метки пути формируются пропеллером, а синус и косинус направления — цифровым магнитным компасом. Интегрирование скорости течения осуществляется в течение всего времени между циклами измерений. Дискретность измерений задается заранее и составляет 7,5; 15; 30 и 60 мин. Датчиком температуры является кварцевый резонатор с частотным выходом. Результаты измерений откладываются в твердотельной (полупроводниковой) памяти, рассчитанной на 4096 циклов измерений.

Диапазон измерения скорости 0,03—2,5 м/с с погрешностью  $\pm(3+2U)\cdot 10^{-2}$  м/с. Система подвески измерителя обеспечивает его ориентацию в потоке с помощью хвостового стабилизатора с точностью до  $5^\circ$  при скорости течения выше 0,05 м/с. Температура воды измеряется в диапазоне  $-2...38^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Запас батарей питания обеспечивает автономность работы до 120 суток. Выпускаются две модификации прибора. Одна рассчитана на глубины до 6000 м с массой на воздухе 55,9 кг, а другая — на глубины до 2000 м с массой 48 кг. Допустимый угол наклона прибора  $15^\circ$ .

*Измеритель течений и температуры Geodyne-850 (США)* имеет цилиндрический корпус, в нижней части которого помещены датчик скорости — ротор Савониуса диаметром 160 мм — и небольшая флюгарка. По периметру ротора размещены 16 небольших магнитов, каждый из которых вызывает электрический импульс при прохождении магнитодиода. Скорость течения измеряется подсчетом числа оборотов ротора за время осреднения 5 с. Направление вектора скорости определяется по сумме показаний магнитного компаса и флюгарки относительно горизонтальной оси корпуса прибора. Регистрация показаний компаса и положения флюгарки осуществляется с помощью маски с 7-разрядным кодом Грея с разрешением по углу  $2,81^\circ$ . Время осреднения в канале направления 0,6 с.

Работа прибора задается программным устройством на основе часов с кварцевым генератором, в котором формируются сигналы опроса датчиков и интервал времени, соответствующий дискретности. Максимальная автономность работы прибора 1 год. Диапазон измерения скорости 0,025—8,5 м/с с погрешностью  $\pm 10\%$  до значения скорости 0,15 м/с и  $\pm 8\%$  до 1,5 м/с. Диапазон измерения температуры воды  $-2...35^\circ\text{C}$ . Допустимый угол наклона  $15^\circ$ . Масса прибора 54 кг. Измеритель используется в составе АБС и устанавливается в разрыве троса на глубинах до 5000 м.

*Измерители течений и температуры моделей 135 и 135-М (фирма «Интероушен», США)* предназначены для измерения течения, температуры и гидростатического давления. Приборы 135-М дополнительно измеряют электропроводимость. Датчик скорости — ротор Савониуса, направление течения определяется с помощью магнитного компаса потенциометрического типа по положению корпуса прибора, ориентированного с помощью стабилизатора в потоке воды. Датчик температуры — линейаризованный термистор. Датчик электропроводимости в модели 135-М — индуктивного типа.

Программное устройство прибора формирует импульсы опроса измерительных каналов с дискретностью от 2 до 80 мин и сигналы отметки времени с дискретностью от 1 до 15 ч. Результаты измерений в 8-разрядном двоичном коде записываются на магнитную ленту.

Для работы измеритель устанавливается в разрыве троса. Его корпус изготовлен из твердого анодированного алюминия и рассчитан на глубины до 1000 м, а в специальном исполнении до 6000 м. Масса прибора на воздухе 16 кг. Диапазон измерения скорости 0,025—8 м/с с погрешностью  $\pm 3\%$ ; чувствительность измерения направления  $\pm 1,4^\circ$ , погрешность  $\pm 8^\circ$ ; диапазон измерения температуры  $0-80^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ; электропроводимость в модели 135-М измеряется в диапазоне  $0-6,5\text{ См/м}$  с погрешностью  $\pm 0,001\text{ См/м}$ . Объем регистраций — 4500 отсчетов, что обеспечивает максимальную автономность работы прибора до 1 года. Допустимый угол наклона  $80^\circ$ .

*Измеритель течений модели VMCM* предназначен для регистрации характеристик течения на глубинах до 5000 м. Датчик скорости — два ортогональных пропеллера с косинусной диаграммой направленности для измерения двух составляющих вектора скорости в системе отсчета прибора. Для обеспечения минимальных отклоне-

ний диаграммы направленности измерителя от косинусоидальной характеристики пропеллеры выполнены двойными. Среднее квадратическое отклонение от косинусоиды в горизонтальной плоскости не превышает 1,5%, в вертикальной — 3%. Направление течения определяется по ориентации корпуса прибора относительно магнитного меридиана магнитным компасом. Единичная метка пути соответствует 1/4 оборота пропеллера (около 0,1 м). Имеется возможность подключения каналов температуры и гидростатического давления. Получаемая информация откладывается в магнитной памяти. Автономность работы определяется типом используемой батареи питания. Информационная емкость магнитного накопителя ( $2,2 \cdot 10^6$  бит) достаточна для записи результатов измерений с дискретностью 1 мин в течение 40 суток. Диапазон измерения скорости 0,02—4 м/с с погрешностью  $\pm 3\%$ . Погрешность измерения направления  $\pm 5^\circ$ . Дискретность измерений задается заранее и может быть 1; 2; 4; 7,5 и 15 мин. Масса прибора 34,5 кг.

Характеристики поверхностного течения можно измерять с помощью *буксируемой системы для измерения течений модели 150А* (фирма O. R. E., США). Модель 150А — геомагнитный электрокинетогрф (отечественный аналог — электромагнитный измеритель течений (ЭМИТ) марки ГМ-15) — предназначена для измерения поперечной составляющей поверхностного течения. Это достигается регистрацией градиента потенциала напряжения, создаваемого движением морской воды в магнитном поле Земли. Получаемая информация регистрируется на бумажной ленте электронного потенциометра, шкала которого откалибрована в узлах и в сантиметрах в секунду. Кроме того, в бортовом блоке имеется специальный переключатель магнитной напряженности на 7 позиций от 0,1 до 0,7 эрстед, предназначенный для регулировки чувствительности в зависимости от местной интенсивности вертикальной составляющей магнитного поля Земли.

Для уменьшения ложных сигналов, вызванных поверхностным волнением, и ошибки, возникающей из-за провисания кабеля, измерительные электроды отнесены от плавучего кабеля. Общая длина кабеля 230 м. Электроды подсоединяются к кабелю через соединительные неметаллические коробки, прикрепленные к нему на расстоянии 100 м друг от друга. Кабель с электродами буксируется за депрессором, погруженным на глубину 12 м. Одним из наиболее важных узлов аппаратуры являются электроды, служащие для контакта датчика с морской водой и подключения к цепи измерительного контура. Используются серебряные-хлорсеребряные неполяризующиеся электроды, помещенные в корпус из оргстекла. Выбор материала электродов обусловлен стабильностью во времени их собственных потенциалов. Электроды подбираются парами с минимальными значениями собственных ЭДС и достаточной для метода стабильностью.

В буксируемом за судном проводнике электродвижущая сила индуцируется только за счет поперечного перемещения, и каждое измерение дает только компонент течения, перпендикулярный на-

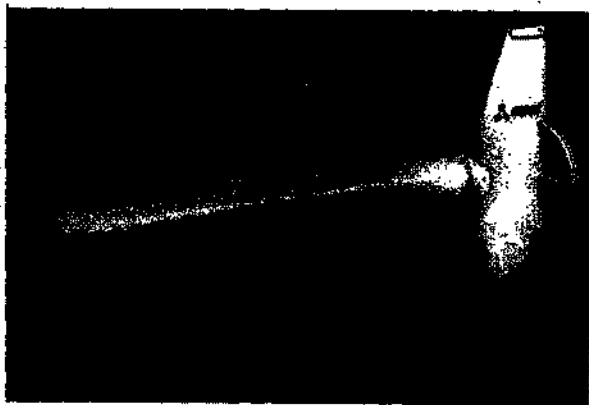


Рис. 8.18. Электромагнитный измеритель течений и температуры СТ-3.

правлению движения судна. Поэтому для определения полного вектора течения следует выполнить два измерения на двух разных курсах судна. Расстояние, проходимое на каждом курсе, должно быть не менее 0,2 мили. Полученные результаты геометрически суммируются. Каждое изменение курса судна обеспечивает получение пары контролируемых друг друга векторов скорости течения, а прямой и обратный ход судна дает контроль положения нуля электродов.

*Электромагнитный измеритель течений и температуры СТ-3* (фирма «Sea-Link System», США). СТ-3 — одноосевой прибор с горизонтальной компоновкой, использующий электромагнитный принцип для регистрации скорости течения. Корпус измерителя имеет торпедообразную форму с хвостовым оперением и оригинальную жестко-осевую подвеску для установки его в разрыве троса АВС, обеспечивающую устойчивую горизонтальную ориентацию при наклонах несущего троса до  $\pm 85^\circ$  (рис. 8.18). К недостаткам устройства можно отнести его относительную чувствительность к вертикальному компоненту течения, движениям несущего троса и случайным возмущениям потока. Инерция корпуса и большой вертикальный киль позволяют прибору механически суммировать высокочастотные изменения течения.

По обе стороны корпуса расположены электроды измерителя скорости. Внутри корпуса помещен постоянный магнит, устанавливающий в воде снаружи корпуса точно сориентированное магнитное поле. Движение воды в потоке вдоль оси измерителя создает разность потенциалов, пропорциональную скорости течения. Использование подобного метода позволяет проводить измерения в поверхностном слое, прибрежной зоне, а также в знакопеременных течениях, что невозможно выполнять даже наиболее широко используемыми приборами вертущего типа.

Направление течения определяется с помощью феррозондового струйного компаса, когда струя потока проходит внутри корпуса по специальному каналу, что обеспечивает последовательно точную регистрацию направления прибора. Он улавливает ориентацию СТ-3

по отношению к магнитному полю Земли и преобразует это магнитное направление в электрический сигнал, доступный для записи.

Датчик температуры — термистор — контролирует внешнюю температуру воды и создает соответствующий электрический сигнал для записи параллельно другим данным. Точная временная привязка обеспечивается твердотелесными часами на кристаллах, которые срабатывают в начале измерительного цикла. Время измерения составляет 1 с.

Диапазон измерения скорости 0,03—3,0 м/с, чувствительность 0,01 м/с, относительная погрешность  $\pm 3\%$ . Погрешность измерения направления  $\pm 5^\circ$ , чувствительность  $\pm 2,8$ . Температура измеряется в пределах  $-2...36^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,15^\circ\text{C}$ . Дискретность измерений устанавливается в пределах 1—225 мин с приростом в 1 мин. Магнитная память, рассчитанная на 15 300 отсчетов, и емкость щелочных батарей обеспечивают автономность работы прибора от одной недели до 6—8 месяцев. Масса измерителя 22,7 кг, предельная глубина установки 5000 м.

*Акустический измеритель течений «Вега-1»* (МГИ, АН Украины) снабжен двухкомпонентным акустическим измерителем скорости с фазоимпульсной схемой измерения и  $\Lambda$ -образной траекторией распространения сигнала. Направление ориентации прибора измеряется феррозондовым синусо-косинусовым компасом, помещенным на двойном кардановом подвесе. В приборе используется векторное осреднение измеряемой скорости. Одновременно производится измерение температуры воды, гидростатического давления и скорости звука. Титановый корпус прибора рассчитан для работы до глубин 6000 м. Диапазон измерения скорости 0—2,5 м/с с погрешностью  $\pm(0,01+0,05U)$  м/с и чувствительностью 0,005 м/с; направление измеряется с погрешностью  $\pm 5^\circ$  при чувствительности  $0,5^\circ$ . Температура воды измеряется в диапазоне  $-2...36^\circ\text{C}$ , скорость звука 1400—1600 м/с, крен и дифферент  $\pm 45^\circ$ , гидростатическое давление 0—600 атм. Дискретность измерений 1,5; 20 и 60 мин.

*Измерители течений АСМ-1 и АСМ-2* (фирма NBIS, США) используют акустический метод незатухающей импульсной волны для измерения двух компонентов скорости течения, для чего применяется двухкомпонентный измеритель скорости с  $\Lambda$ -образной траекторией распространения акустических сигналов. Ориентация приборной системы координат относительно магнитного меридиана измеряется по феррозондовому компасу. Результаты измерений в 12-разрядном двоичном коде заносятся в полупроводниковую статическую память емкостью 10 000 циклов измерений. В АСМ-2 предусмотрена цепь коррекции температурной зависимости скорости звука в воде в диапазоне  $-2...30^\circ\text{C}$  с погрешностью измерения  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  и постоянной времени 1 мин.

Прибор работает следующим образом. На вход излучающего электроакустического преобразователя (А) подается сигнал с генератора, вырабатывающего электрические колебания с несущей частотой 1,6 МГц. Электроакустический преобразователь излучает в

морскую воду узкий, с угловой шириной  $1^\circ$ , пучок акустической энергии, подающийся на акустическое зеркало (С). Отражаясь от зеркала, пучок попадает на приемник (В). Затем от В пучок таким же образом попадает на А. Пучок акустической энергии при движении в ту или иную сторону, встречаясь с течением, будет изменяться по фазе, а потоки, перпендикулярные плоскости расположения электроакустических преобразователей А и зеркала С, не учитываются. Разница сигналов, приходящих от А и В, будет являться функцией частоты, расстояния между излучателями-приемниками, скорости звука в воде и скорости течения. Отсюда неизвестным фактором является лишь скорость течения.

Диапазон измерения скорости в АСМ-1 0—3,0 м/с с чувствительностью 0,003 м/с; в АСМ-2 диапазон измерения 0—2,5 м/с с чувствительностью 0,005 м/с. Погрешность измерения обоих приборов  $\pm(0,01+0,05U)$  м/с, время осреднения в канале скорости у АСМ-2 0,2 с. Погрешность измерения направления  $\pm 2^\circ$  при чувствительности 0,5°. Дискретность измерений задается в пределах 10—150 мин. Допустимый угол наклона  $30^\circ$ , предельная глубина установки в зависимости от типа корпуса 3000 или 6000 м. Температура измеряется в пределах  $-2,4...35,8^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Масса прибора 43 кг, диаметр 77 мм и длина 525 мм.

Следует отметить, что в настоящее время измерители фирмы NBIS имеют наилучшие характеристики, достигнутые в мировой практике океанографического приборостроения, и наиболее успешно могут использоваться для исследования мелкомасштабной изменчивости.

Исследования динамической погрешности отечественных измерителей скорости БПВ-2, ДИСК, АЦИТ, «Поток» (по данным В. М. Кушнир и В. Б. Титова) были проведены в тарифовочном бассейне ГГИ. Исследовалась зависимость динамической погрешности  $\Delta_u = M(U) - U$  (где  $M(U)$  — средняя измеренная скорость;  $U$  — скорость проточки) испытуемых приборов от отношения скорости к амплитуде пульсаций скорости ( $U/U'$ ). При отношении  $U/U' \approx 1$  происходит резкое увеличение относительной погрешности  $\Delta_u/U$ , причем для приборов АЦИТ и «Поток» — в сторону отрицательных значений погрешности, а для БПВ-2 и ДИСК — в сторону положительных.

Исследования зависимости  $\Delta_u/U = f(U/U')$  для некоторых зарубежных измерителей (RSM-4, S-4, АСМ-1, VMCM) показали, что при  $U/U' = 5...8$  относительная динамическая погрешность резко возрастает, при  $U/U' = 1$  она составляет 0,3—0,5. Минимальную погрешность имеет пропеллер VMCM.

В целом для всех известных измерителей скорости течений пульсации скорости или колебания точки подвеса прибора на частотах около  $10^{-1}$  Гц создают относительно большую динамическую погрешность измерения скорости, если амплитуда пульсационной составляющей скорости потока примерно равна или больше средней скорости течения.



## Глава 9

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ

### 9.1. Гидрооптическое поле

Измерение оптических характеристик вод Мирового океана имеет существенное значение в общем комплексе океанографических исследований. Оптические характеристики океанских вод определяются свойствами чистой воды, растворенных веществ и взвеси. Кроме того, на распространение света в воде влияют пузырьки воздуха и различного вида неоднородности. Основное влияние на оптические свойства воды оказывают растворенные неорганические соли, органические соединения и взвеси.

Оптические свойства вод — их прозрачность в различных частях спектра, показатели рассеяния, поглощения и их соотношение — определяют световой режим на глубинах, который в свою очередь играет существенную роль в протекании процессов фотосинтеза органического вещества, что является основой всей биологической продукции океана. Кроме того, оптические характеристики вод могут быть полезны для решения ряда задач океанографии, динамики вод, процессов образования и переноса осадков.

Распространение света в океанской воде сопровождается его поглощением и рассеянием. Основными поглощающими компонентами являются чистая вода, растворенные вещества, пигменты фитопланктона. Форма спектра поглощения определяется соотношением между поглощением растворенным веществом и поглощением взвесью. Поглощение растворенным веществом в глубинных слоях выше, чем в поверхностных. Поглощение же взвесью уменьшается с глубиной. Рассеяние света происходит из-за оптических неоднородностей (молекулярное рассеяние) и из-за наличия взвешенных частиц. Для океана характерны повышенные значения рассеяния в поверхностном слое, убывающие с глубиной ниже слоя термоклина.

Оптика придонных вод в основном определяется взаимодействием их с дном, процессом вмывивания осадков. Исследования показали возможность классифицировать показатель ослабления в придонных слоях по трем типам. Первый характеризуется наличием у дна слоя пониженной прозрачности толщиной 50—100 м. Второй — плавным постепенным понижением прозрачности ко дну. Третий тип связан с наличием сильных течений, вымывающих из грунта мелкодисперсную фракцию, что препятствует образованию осадков на дне и приводит к равномерному распределению взвеси по всему придонному слою.

Изменение интенсивности света, проникающего в глубину водной массы, связано также с изменением спектрального состава, так как вода является избирательным фильтром. Кроме того, на спектр проникающего излучения влияют размеры и количество взвешенных и растворенных веществ. Насыщенный синий цвет тропических и субтропических областей океана переходит в сине-зеленый и зеленый в более высоких широтах и к белесовато-зеленым оттенкам в мутных прибрежных водах.

С помощью оптических методов по светорассеянию можно определять количественный состав взвеси, параметры морского волнения, обнаруживать поверхностное загрязнение воды нефтепродуктами, изучать пространственное распределение биологической продукции. Изучение характеристик прозрачности воды, ее способности к различному поглощению и рассеянию в различных районах Мирового океана позволяет анализировать причины и происхождение течений, исследовать жизнедеятельность планктона. Применение флуоресцентных методов исследования дает возможность изучать турбулентную диффузию примесей в океане. Изменение температуры в поверхностном деятельном слое связано в основном с потреблением солнечной энергии, которая определяет условия фотосинтеза и обеспечивает жизнедеятельность зоо- и фитопланктона. Таким образом, гидрооптические характеристики в видимом и ближнем УФ участках спектра являются наиболее информативными при решении прикладных задач гидрофизики.

## 9.2. Оптические свойства и характеристики морской воды

С точки зрения оптики морская вода представляет собой лучистую поглощающую среду — при распространении светового луча в ней одновременно происходит поглощение и рассеяние световой энергии. Оптические характеристики морской воды в основном определяются свойствами собственно воды, но гораздо большее влияние на распространение света в море оказывают оптически активные вещества, растворенные или взвешенные в ней.

Характер взаимодействия излучения с окружающей средой определяется в основном процессами поглощения и рассеяния. Параллельный пучок света, проходя сквозь морскую воду, ослабляется под влиянием этих процессов. Поглощение обуславливает преобразование световой (лучистой) энергии в другие виды энергии, рассеяние — отклонение светового луча от первоначального направления. Количество поглощенной и рассеянной энергии обычно выражают в процентах на метр.

Для исследования гидрооптического поля в море необходимо измерять следующие характеристики: спектральный показатель ослабления направленного света; спектральный показатель поглощения, рассеяния; индикатрису рассеяния. Оптические характерис-

тики можно разделить на два вида: первичные, или собственные, характеристики, присущие водной среде и не зависящие от способа освещения различными источниками света, а также вторичные, производные, описывающие состояние естественного светового поля в море. К первому виду относятся:

— показатель поглощения  $\kappa$  — коэффициент поглощения бесконечно тонкого слоя среды для нормально падающего на него пучка, отнесенный к толщине  $dl$  этого слоя ( $\text{м}^{-1}$ ):

$$\kappa = -(1/\Phi)d\Phi_x/dl,$$

где  $\Phi$  — поток практически параллельного монохроматического излучения, облучающий элементарный объем  $dV$ , толщина которого в направлении распространения исходного пучка излучения равна  $dl$ ;  $d\Phi_x$  — элементарный поток излучения, поглощенный при прохождении объема  $dV$ ;

— показатель рассеяния  $\sigma$  — коэффициент рассеяния бесконечно тонкого слоя среды для нормально падающего на нее пучка, отнесенный к толщине этого слоя ( $\text{м}^{-1}$ ):

$$\sigma = -(1/\Phi)d\Phi_s/dl,$$

где  $d\Phi_s$  — элементарный поток излучения, рассеянный при прохождении объема  $dV$ ;

— показатель ослабления  $\varepsilon$  — коэффициент ослабления бесконечно тонкого слоя среды для нормально падающего на нее пучка, отнесенный к толщине этого слоя ( $\text{м}^{-1}$ ):

$$\varepsilon = \kappa + \sigma = -(1/\Phi)d\Phi_e/dl,$$

где  $d\Phi_e$  — элементарный пучок излучения, ослабленный при прохождении объема  $dV$ .

Производные характеристики:

— индикатриса рассеяния  $X(\gamma)$  — плотность вероятности рассеяния под углом  $\gamma$  (величина безразмерная)

$$X(\gamma) = 4\pi\sigma(\gamma)/\sigma,$$

где  $\sigma(\gamma)$  — показатель рассеяния в данном направлении.

Индикатриса рассеяния является функцией углового распределения показателя рассеяния в данном направлении, нормированная к общему показателю рассеяния. Зная индикатрису, путем интегрирования можно определить значение полного показателя рассеяния;

— показатель рассеяния вперед

$$\sigma_\lambda = 2\pi \int_{\pi/2}^0 \sigma(\gamma) \sin\gamma d\gamma,$$

характеризующий рассеяние в телесном углу  $2\pi$  стерадиан, ось которого совпадает с направлением падающего пучка излучения;

— показатель рассеяния назад

$$\beta_{\lambda} = 2\pi \int_{\pi}^{\pi/2} \sigma(\gamma) \sin \gamma d\gamma,$$

характеризующий рассеяние в телесном угле  $2\pi$  стерадиан, ось которого противоположна направлению падающего пучка излучения;

— коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния

$$K = \sigma_{\lambda}/\beta_{\lambda},$$

определяющий отношение показателя рассеяния вперед к показателю рассеяния назад.

Измерение этих характеристик, полностью определяющих оптические свойства воды, должно производиться для всей видимой части спектра от ближнего ультрафиолетового (350 нм) участка до ближнего инфракрасного (780 нм).

Кроме собственных гидрооптических характеристик морской воды существуют характеристики, определяемые наличием, характером и распределением входящей в море световой энергии от естественных источников (в основном Солнце). Эти параметры характеризуют световое поле в водной среде, которое зависит как от собственных гидрооптических характеристик, так и от состояния атмосферы и условий освещения. К этим характеристикам относятся:

— облученность сверху — поток излучения, падающий сверху ( $0-180^\circ$ ) на бесконечно малый элемент горизонтальной поверхности, включающий рассматриваемую точку, отнесенный к площади этого элемента ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):

$$E \downarrow(\lambda) = d\Phi \downarrow(\lambda)/dS;$$

— облученность снизу — поток излучения, падающий снизу ( $180-360^\circ$ ) на бесконечно малый элемент горизонтальной поверхности, включающий рассматриваемую точку, отнесенный к площади этого элемента ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):

$$E \uparrow(\lambda) = d\Phi \uparrow(\lambda)/dS;$$

— пространственная облученность — суммарная интенсивность излучения, поступающего в точку со всех направлений пространства ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):

$$E_0(\lambda) = \int_{4\pi} E_{\pi\lambda} d\Omega;$$

— сферическая облученность — средняя облученность наружной поверхности сферы бесконечно малого радиуса с центром в данной точке среды, создаваемая излучением, приходящим из всего окружающего пространства:

$$E_S(\lambda) = \int_{4\pi} E_{\pi\lambda} d\Omega/(4\pi) = E_0(\lambda)/(4\pi);$$

— яркость излучения — отношение нормальной облученности, создаваемой излучением, приходящим в данную точку пространства, в элементарном телесном угле  $d\Omega$  к назначению этого угла ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ ):

$$\beta_\lambda = dE_{\lambda n}/(d\Omega).$$

При измерении параметров светового поля эти характеристики являются основными.

### 9.3. Определение относительной прозрачности и цвета морской воды

До недавнего времени изучение оптических свойств морской воды сводилось почти исключительно к определению глубины исчезновения видимости белого диска — прозрачности — и оценке цвета воды по шкале цветности.

Первые наблюдения за относительной прозрачностью морской воды произведены О. Е. Коцебу во время кругосветного плавания на бриге «Рюрик» в 1814—1818 гг. Во время рейса было выполнено 14 измерений, при этом Коцебу наблюдал глубину исчезновения белого и красного дисков, опускаая на лотiline обыкновенные столовые тарелки, одна из которых была обернута красной материей.

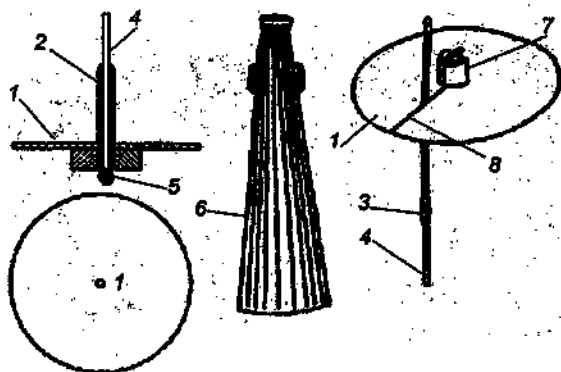
В 1827—1833 гг. очень обстоятельные наблюдения за прозрачностью и цветом воды были выполнены капитан-лейтенантом М. Ф. Рейнике при проведении гидрографических работ на Белом море и у берегов Мурмана. Рейнике регистрировал при штиле не только глубину пропадания белого диска (тарелки), но и глубину и грунт дна в месте наблюдений, высоту глаза наблюдателя и облачность, а о цвете воды судили по цвету волн. Это была первая систематическая съемка прозрачности и цвета воды в истории океанографии.

В 1865 г. исследования прозрачности воды в Средиземном море были проведены патером Секки и капитаном Чинальди. Они проводили наблюдения с помощью дисков диаметром до 2,37 м. Чаще всего использовался белый диск диаметром 30—50 см, который и получил в 90-х годах XIX в. название диска Секки. Недостатком дисков прозрачности является невозможность работы с ними в темное время суток. И. Б. Шпидер в экспедиции на канонерской лодке «Черноморец» в 1890 г. пытался выйти из этого положения, погружая на глубину электрическую лампочку. Но из-за трудности сопоставления данных наблюдений с помощью лампочки и диска этот способ не получил распространения. Только много лет спустя эта идея воплотилась в приборах для определения оптических постоянных морской воды.

В настоящее время для измерения относительной прозрачности морской воды используют стандартный диск прозрачности, представляющий собой металлический круг диаметром 800 мм и толщиной 5 мм, выкрашенный белой матовой краской. По оси диска проходит латунная трубка длиной 155 мм, предназначенная для крепления

Рис. 9.1. Диск белый для определения прозрачности воды.

1 — диск; 2 — латунная трубка; 3 — марка; 4 — трос; 5 — груз; 6 — артельная трубка; 7 — грузик; 8 — прорезь.



троса. Под диском крепится кольцеобразный металлический груз, служащий для обеспечения вертикальности троса (рис. 9.1).

Наблюдения за относительной прозрачностью проводятся с теневого борта судна вручную или с помощью лебедок. В первом случае трос, на котором опускается диск прозрачности, должен быть размечен марками на метры и дециметры на протяжении 20—50 м, начиная от поверхности диска; во втором — отсчеты глубины погружения диска берутся по блок-счетчику.

Медленно опуская диск, отмечают глубину его полного исчезновения, затем, опустив еще на 1—2 м, выжидают 30—60 с, чтобы исчезло кажущееся изображение диска в глазах, после чего начинают подъем. Глубина появления диска также отмечается. Относительной прозрачностью моря в точке наблюдений является среднее из обоих отсчетов. Для получения более качественных результатов наблюдения повторяют 2—3 раза.

Собственный цвет моря, качественно характеризующий условия поглощения и рассеяния излучения в видимой части спектра и зависящий от физико-химических характеристик воды, долгое время определяли на глаз «по цвету волн» без всякого эталона. В 90-х годах XIX в. швейцарец Форель предложил шкалу для определения цвета воды альпийских озер. Она представляла собой набор стеклянных пробирок, наполненных смесью растворов синего и желтого цветов, взятых в разных пропорциях. Для наблюдений в прибрежных районах морей, где бывают воды и коричневых оттенков, шкала была дополнена немцем Уле пробирками с примесью коричневого цвета. Помещенная в деревянную раму-оправу, предложенную Ю. М. Шокальским, эта шкала, получившая название шкалы Фореля—Уле, используется и сейчас. Шкала цветности состоит из 22 стеклянных западных пробирок от № 1 до 21 (№ 11 повторяется), содержащих цветные растворы с постепенным переходом от темно-синего — типичный цвет океанской воды (пробирка № 1) — до коричневого цвета — болотная вода (пробирка № 21). Пробирки вставлены в две деревянные рамки, которые помещаются в специальную складывающуюся оправу (рис. 9.2).

Наблюдения за цветом воды с помощью шкалы производится на фоне белого диска, погруженного в море на глубину, равную половине



Рис. 9.2. Шкала цветности.

глубины видимости диска. Под пробирки шкалы подкладывают лист белой бумаги и сравнивают цвет воды на фоне диска с цветом жидкости в пробирках на фоне белой бумаги. Найденный цвет воды обозначается номером соответствующей пробирки. При отсутствии диска цвет воды можно определять, положив под пробирки черную бумагу.

При всей своей простоте эти методы имеют слишком много недостатков и не могут удовлетворить современным требованиям, предъявляемым к научным исследованиям. Они дают лишь качественную оценку оптических свойств поверхностного слоя воды, но не имеют однозначной связи с какими-либо оптическими характеристиками вод и поэтому не могут быть использованы для их количественного определения. Тем более они не дают возможности судить о распределении оптических свойств в толще воды.

В 20-х годах XX в. благодаря трудам В. В. Шулейкина, Чандра Рамана и других широкое развитие получила теоретическая оптика моря, что послужило толчком для создания ряда приборов, позволяющих проводить принципиально новые наблюдения.

#### 9.4. Измерители гидрооптических характеристик

Важным требованием, предъявляемым к аппаратуре для измерений гидрооптических характеристик, является сопоставимость результатов измерений, обеспечиваемых метрологической аттестацией по единой поверочной схеме. Кроме того, необходимо предусматривать возможность унифицированности и технологичности изготовления этой аппаратуры. Любой прибор для измерения гидрооптических характеристик состоит из трех функционально законченных узлов: оптического блока, диспергирующего элемента и фотоприемника. Оптический блок предназначен для преобразования и формирования световой энергии, в нем практически определяется вид измеряемой оптической характеристики. Диспергирующий элемент, представленный в виде светофильтра, призмы или дифракционной решетки, обеспечивает выделение необходимой длины волны исследуемого спектра. Фотоприемник предназначен для приема светового сигнала, преобразования его в электрический и дальнейшего преоб-

разования электрического сигнала для передачи его в бортовое устройство и регистратор.

Диспергирующий элемент и фотоприемник выполняют в принципе одни и те же функции в различных измерителях гидроакустических характеристик. Поэтому напрашивается вывод, что на базе унифицированных монохроматора и фотоприемника можно создавать измерители практически любых гидрооптических характеристик, конструируя при этом только оптический блок и необходимую систему управления и автоматики.

Самой доступной для измерения гидрооптической характеристикой является прозрачность, или, точнее говоря, показатель ослабления направленного света. Между прозрачностью  $\theta$ , коэффициентом пропускания  $T$  и показателем ослабления  $\epsilon$  существуют определенные соотношения. Коэффициент пропускания слоя морской воды определяется отношением потока излучения, прошедшего без изменения направления сквозь данный слой, к потоку, входящему в этот слой. Прозрачность же морской воды есть коэффициент пропускания, отнесенный к однородному слою толщиной 1 м, и выражается обычно в процентах на 1 м. С показателем ослабления прозрачность связана соотношением  $\epsilon = -\lg_{10}\theta$ . Показатель ослабления численно равен величине, обратной расстоянию, на котором поток параллельного пучка излучения ослабляется в 10 раз. Показатель ослабления направленного света несет в себе информацию о концентрации растворенных веществ и о молекулярном рассеянии.

Для измерения показателя ослабления в море в настоящее время используются опускаемые с борта судна на кабеле, кабель-тросе или тросе различного типа фотометры-прозрачномеры. Диапазон изменений этой характеристики в водах Мирового океана составляет  $0,01-1 \text{ м}^{-1}$ , при этом необходимо учитывать, что в очень чистых водах (Саргассово море, Индийский океан) изменения показателя ослабления на глубинах свыше 200-300 м зачастую не превышают  $0,005 \text{ м}^{-1}$ . Поэтому для обеспечения надежных измерений  $\epsilon(\lambda)$  в водах Мирового океана прозрачномер должен иметь диапазон  $0,01-1 \text{ м}^{-1}$  с чувствительностью не хуже  $0,001 \text{ м}^{-1}$ .

При разработке прозрачномеров необходимо также учитывать, что существует несколько методов измерения этого параметра: видимости объектов, базисный, обратного расслоения, фазометрический, нестационарного рассеяния. В большинстве существующей в настоящее время аппаратуры для определения  $\epsilon$  используется базисный метод, основанный на непосредственном использовании закона Бугера, согласно которому световой поток  $\Phi$  испытывает ослабление, проходя расстояние  $l$ :

$$\Phi_l = \Phi_0 e^{-\epsilon l},$$

где  $\Phi_l$  — поток, регистрируемый фотоприемником;  $\Phi_0$  — поток, входящий в исследуемую среду;  $\epsilon$  — показатель ослабления потока.

Закон Бугера оправдывая для монохроматического параллельного пучка света. Измерение показателя ослабления «белого» света не представляет интереса, так как морская вода селективна и с глуби-



ной происходит выделение сине-зеленой части спектра из проникающего излучения. При измерении ослабления «белого» света фотоприемник регистрирует общее изменение светового потока, в котором невозможно выделить влияние воды на спектральный состав света из общего ослабления за счет рассеивающих и поглощающих свойств. Поэтому измерители всех гидрооптических характеристик должны обеспечивать спектральные измерения.

В настоящее время в основном реализуются два способа разложения «белого» света: использование узкополосных светофильтров и дифракционной решетки. Использование нескольких светофильтров с одним фотоприемником позволяет при достаточно простой конструкции измерителя получить спектральное распределение показателя ослабления по 6—8 точкам. Но увеличение числа точек по спектру усложняет конструкцию и увеличивает габариты прибора. Кроме того, этот метод значительно увеличивает время на проведение измерений на каждом горизонте из-за смены фильтров и последовательного опроса каждого светофильтра.

Использование монохроматора на дифракционных решетках позволяет получить практически непрерывный спектр, причем время развертки спектра можно широко варьировать от  $3 \cdot 10^{-2}$  с до времени, необходимого для проведения измерений на одном участке спектра. Конструкции монохроматоров могут быть различными.

В качестве примера измерителя показателя ослабления можно привести разработанный в МГИ АН Украины логарифмический фотометр-прозрачномер (ЛФП) (рис. 9.3). ЛФП позволяет измерять показатель ослабления направленного света на спектральных участках видимой и близкой ультрафиолетовой областей спектра на глубинах до 2000 м в диапазоне  $0,05\text{--}0,5 \text{ м}^{-1}$  с точностью 1—2 %. Прибор состоит из погружаемого блока и бортового устройства, содержащего пульт управления и регистратор. Погружаемый блок опускается в воду на трехжильном кабель-тросе. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность около 150 Вт.

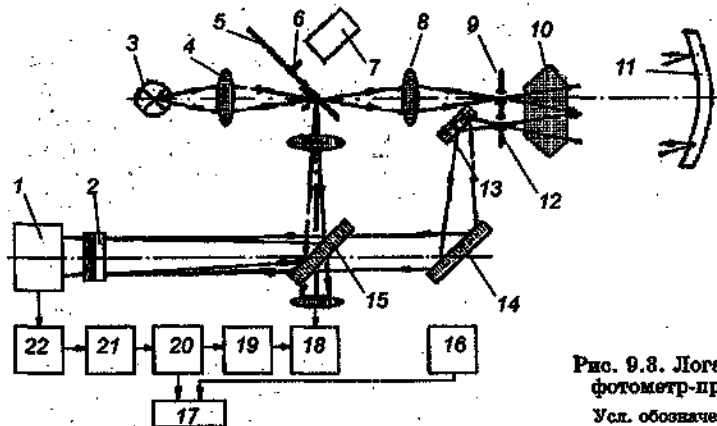


Рис. 9.3. Логарифмический фотометр-прозрачномер.  
Усл. обозначения см. текст.

В приборе используется двухлучевая фотометрическая схема с одним приемником радиации, поочередно освещаемым двумя пучками света. В качестве приемника излучения в приборе используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), работающий в линейном режиме световой характеристики. Свет от источника (3) (лампа накаливания ЦН-75) с помощью конденсатора (4) фокусируется на диафрагме (5). Непосредственно за диафрагмой находится модулятор (6) — зеркальный диск с вырезами, вращающийся с помощью мотора (7). Модулятор поочередно посылает свет в измерительный тракт и в тракт сравнения. В первом случае световой поток линзой (8) фокусируется на выходной диафрагме (9) и проходит через плоскопараллельный иллюминатор (10) в исследуемую воду. После отражения от сферического зеркала (11) световой поток фокусируется на входной диафрагме (12) и после отражения от плоских зеркал (13) и (14) поступает на приемник света (1), пройдя по пути прозрачную пластину (15) и светофильтр (2). Путь лучей света в воде равен 2 м. Во втором случае световой поток, отразившись от пластины (15), попадает непосредственно на приемник (1). Часть потока, прошедшая через пластину, используется для освещения вспомогательного приемника 18т-фототриода ФТ-1. Перед фотоумножителем расположен фильтр (2), выделяющий необходимый спектральный участок. Светофильтр меняется по команде с пульта управления. Приведенная схема обеспечивает попеременное освещение приемника различными потоками монохроматического света непосредственно от источника  $\Phi_0$  и прошедшим сквозь слой исследуемой среды  $\Phi$ . ФЭУ работает в линейном режиме, на выходе возникают потоки  $I_0$  и  $I$ , пропорциональные световым потокам  $\Phi_0$  и  $\Phi$ . На выходе ФЭУ стоит логарифмирующий элемент (диод) (22), позволяющий получать на его выходе напряжение, пропорциональное  $\lg I$  и  $\lg I_0$ . Переменная остающаяся напряжения в этом случае равна разности напряжений, возникающих от этих двух потоков, т. е.

$$\lg I - \lg I_0 = \lg(I/I_0),$$

а эта величина пропорциональна  $\lg(\Phi/\Phi_0)$ , т. е. искомой величине ослабления  $\varepsilon$ . Переменное напряжение усиливается в (21) и выпрямляется в (20) (синхронном детекторе). Управляющее напряжение для синхронного детектора вырабатывается фототриодом (18) и усиливается в (19). Фототриод (18) освещается прерывистым потоком, прошедшим через модулятор, что исключает необходимость точной стабилизации числа оборотов мотора модулятора.

Таким образом, на выходе схемы подводной части прибора получается постоянное напряжение, которое пропорционально искомому показателю — ослаблению света  $\varepsilon$ .

Схема не чувствительна к изменениям интенсивности источника света (3), чувствительности приемника света (1), изменениям коэффициента усиления усилительного тракта, изменению скорости вращения двигателя модулятора, так как сигналы от обоих световых пучков изменяются одновременно и пропорционально и их отношение остается постоянным, не зависящим от нестабильности указан-

ных характеристик. Измерения можно проводить в любое время суток, так как прибор нечувствителен к заветке дневным светом. В погружаемой части прибора есть датчик давления (16), служащий для измерения глубины погружения прибора.

Инерционность прибора мала, поэтому весь процесс измерения протекает достаточно быстро. Достоинством прибора является также то, что градуировочные кривые для различных цветных светофильтров практически одинаковы.

**Измерители рассеяния.** Рассеяние — отклонение света от прямолинейного распространения. Одним из важнейших показателей при изучении рассеяния служит индикатриса, определяющая рассеяние как функцию угла рассеяния. Показатель рассеяния и индикатриса рассеяния излучения позволяют получать более полные данные о концентрации взвеси и функции распределения частиц по размерам, так как они практически связаны с качественным изменением состава взвеси. В океанологической практике измеряются два вида этой характеристики: общий показатель рассеяния

$$\sigma = 0,5 \int_0^\pi x_\lambda \sin \gamma d\gamma,$$

который определяет интегральные рассеивающие свойства исследуемой среды, а также показатель рассеяния под фиксированным углом.

Для оценки возможных изменений показателя рассеяния необходимо, как показали результаты экспериментальных исследований, отдельно рассматривать индикатрису рассеяния, интегральный показатель рассеяния и показатель рассеяния под фиксированным углом. При измерении индикатрисы рассеяния сила света под разными углами может изменяться на 5—6 порядков. Интегральный показатель рассеяния морской воды в различных районах Мирового океана изменяется от  $0,02 \text{ м}^{-1}$  для  $\lambda = 546 \text{ мкм}$  до  $0,44 \text{ м}^{-1}$  (субполярные воды Тихого океана). Показатель рассеяния под фиксированным углом определяется при измерениях индикатрисы рассеяния, т. е. динамический диапазон этих измерителей должен быть не менее  $10^5$ .

Оптическая схема любого измерителя рассеяния (нефелометра) содержит источник света, от которого элементами оптической схемы формируется параллельный пучок, освещающий исследуемый объем. Выходящие из исследуемого объема рассеянные там световые лучи формируются другими элементами оптической схемы и направляются на фотоприемник. Дальнейшее преобразование сигнала такое же, как у любого фотометра.

Индикатриса рассеяния морской воды имеет резко вытянутую форму. Причем на область углов от  $0$  до  $1^\circ$  приходится от 10 до 40 % всего рассеянного света, а от  $0$  до  $10^\circ$  — 80 %. Поэтому при определении общего показателя рассеяния необходимо точно знать распределение рассеянной световой энергии в малых (от  $0$  до  $8^\circ$ ) углах.

Существуют три принципиально различающиеся оптические схемы измерителей рассеяния: схема измерения общего показателя рассеяния, схема измерения индикатрисы рассеяния и схема изме-

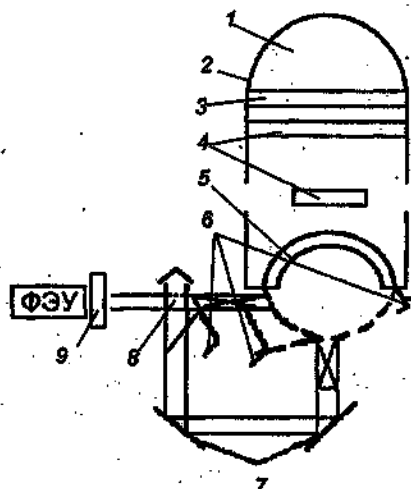


Рис. 9.4. Измеритель общего показателя рассеяния.

1 — источник света; 2 — вертикальный корпус; 3 — световой фильтр; 4 — молочные рассеиватели; 5 — цилиндрический коллиматор; 6 — световод; 7 — зеркало; 8 — вертикальный модуль; 9 — световой фильтр.

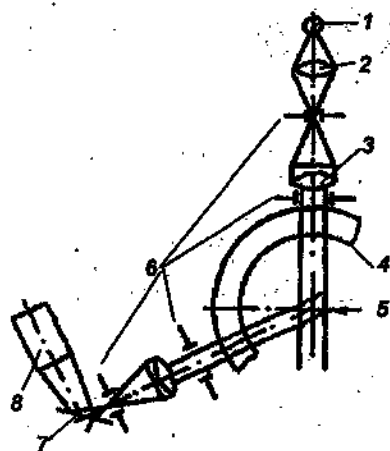


Рис. 9.5. Измеритель индикаторного рассеяния.

1 — источник света; 2 — конденсатор; 3 — объект; 4 — цилиндрический коллиматор; 5 — рассеивающий объект; 6 — диафрагма; 7 — плоское зеркало; 8 — фотоэлемент.

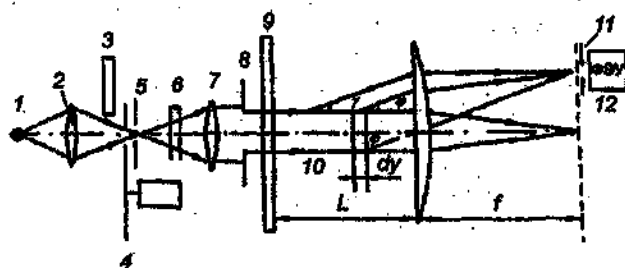


Рис. 9.6. Измеритель рассеяния под малыми углами.

1 — источник света; 2 — конденсатор; 3 — объект; 4 — модулятор; 5 — диафрагма; 6 — световой фильтр; 7 — коллиматор; 8 — диафрагма; 9 — ослабитель; 10 — последняя опора; 11 — объект приёма; 12 — фотоэлемент;  $L$  — длина кюветы;  $f$  — фокусное расстояние.

рассеяния под малыми углами (рис. 9.4—9.6). Все оптические элементы этих схем объединены в оптический блок, который может быть выполнен отдельным конструктивом. После преобразования световой поток попадает в фотоприёмное устройство (фотоприёмник).

Измерения подводной облученности начинают с измерения облученности поверхности моря (еще на палубе судна), несмотря на то, что в расчетные формулы оптических характеристик светового поля введена подповерхностная облученность, которая на порядок меньше облученности поверхности моря, составляющей примерно  $210 \text{ Вт/м}^2$ . Она определяет максимальное значение измеряемой фотометром облученности. С глубиной облученность значительно уменьшается. И диапазон изменения подводной облученности от поверхности до глубин 180—200 м составляет  $2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . При этом уменьшение

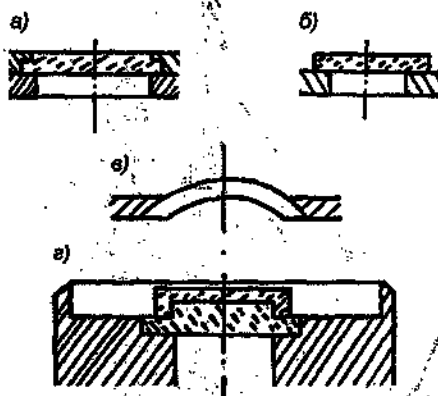


Рис. 9.7. Типы коллекторов измерителей подводной облученности.

а — плоский, б — выносной, в и г — широкоугольные.

копелосные интерференционные светофильтры. При всех недостатках использования (наличие побочных максимумов в диапазоне измерений; коэффициент пропускания их не равен нулю; зависимость спектральной характеристики интерференционного фильтра от угла его наклона к параллельному световому пучку), которые в принципе можно устранить, применение светофильтров при измерениях в дискретных участках спектра, если их число не более 6—8, имеет преимущество перед монохроматором. Но для спектральных измерений использование монохроматора, несмотря на увеличение при этом габаритов прибора, дает существенные преимущества: позволяет, во-первых, проводить спектральные измерения с непрерывной разверткой, а во-вторых — уменьшить проникновение побочных спектров на фотоприемник при измерениях. Даже малейшее проникновение синего или зеленого света при измерениях в других участках спектра вносит значительную ошибку, увеличивающуюся с глубиной.

Измерения спектральной плотности энергетической яркости для расчета спектральных коэффициентов яркости  $P_\lambda$  небосвода и моря показали, что диапазон изменения энергии во всем исследуемом участке спектра (360—780 нм) составляет  $5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Эти измерения проводились в летнее время при положении Солнца близко к зениту.

В настоящее время существуют лишь единичные экземпляры макетов измерителей поглощения из-за технических трудностей создания оптической схемы подобного прибора. Основная сложность заключается в необходимости собрать на фотоприемнике весь свет от источника, рассеянный исследуемой средой. Для этой цели используется или метод «молочного стекла», или интегрирующая сфера. Во втором случае составными, функционально отдельными узлами оптической схемы прибора являются монохроматор, элементы электронной схемы и фотоприемное устройство.

ее происходит за счет влияния поглощения, рассеяния и изменения спектрального состава.

Оптическая схема измерителей облученности в основном содержит два необходимых элемента: коллектор и диспергирующий элемент. Коллекторы могут быть плоскими, выносными и широкоугольными (рис. 9.7). В большинстве измерителей используется плоский коллектор (рис. 9.7 а), являющийся одновременно и иллиминатором, изготовленный либо из стекла марки К-8, либо из органического «молочного». В качестве диспергирующего элемента обычно используются уз-

# Глава 10

## ОТБОР ПРОБ ГРУНТА

### 10.1. Характеристика морских грунтов

Для более полной характеристики дна моря важно получить сведения о грунтах. Такие сведения необходимы для обеспечения нужд мореплавания и народного хозяйства: выбора места якорных стоянок, строительства гидротехнических сооружений, прокладки подводных кабелей, нефтепроводов и т. д. В последнее время интерес к изучению грунтов возрос в связи с расширением добычи в шельфовой зоне полезных ископаемых. Все это послужило основанием для организации специальных работ по изучению грунтов дна — так называемой грунтовой съемки.

Грунт дна — это любой материал, составляющий поверхность дна морей и океанов. Определение донных грунтов, или так называемую грунтовую съемку, производят с судна, лежащего в дрейфе или стоящего на якорю, с целью получить информацию об их составе и распределении. Эти исследования осуществляются путем взятия проб грунта специальными устройствами в точках, рационально расположенных по всей площади обследования и называемых грунтовыми станциями, а также путем определения характеристик грунта между станциями косвенными методами.

Частота выполнения грунтовых станций определяется возможностью выявления пространственного распределения грунтов с одинаковыми характеристиками по всей обследуемой акватории. Поэтому при их планировании необходимо учитывать рельеф дна и специфику рельефообразующих факторов. Необходимо, по возможности, обследовать возвышенности, впадины и их склоны. Обязательно должен быть выявлен характер грунта на мелях, банках, косах и других подводных опасностях. В районах с равнинным рельефом и постоянным характером рельефообразующих процессов подробность грунтовой съемки может быть понижена.

Основная часть морских грунтов представляет собой современные рыхлые или твердые осадочные породы. Древние коренные горные породы выходят на поверхность океанского дна значительно реже и встречаются на крутых горных склонах или в районах с сильными придонными течениями. В зависимости от происхождения донные отложения подразделяются на терригенные, биогенные и хемогенные.

Терригенные отложения образуются либо в результате абразивных процессов, разрушающих коренные породы, из которых сложены морские берега или дно, либо выносятся речными потоками. Распространены эти отложения в пределах материковой отмели.

Биогенные отложения относятся к глубоководным и состоят из скелетов, панцирей или раковин различных морских организмов, уцелевших от разложения при опускании на дно.

Хемогенные отложения, относящиеся к глубоководным, образуются в результате химических процессов, возникающих во взвесах и в растворах различных веществ в морской воде. Доля этих отложений в океанах незначительна.

Кроме указанных глубоководных отложений в океане часто встречается так называемая красная глина — пластичный вязкий грунт шоколадного цвета, образующийся в результате разложения морской водой продуктов вулканических извержений.

Однако основное значение имеет характеристика механических свойств грунта, его гранулометрический состав. По этому признаку различают древние горные породы (плотные осадочные грунты или изверженные кристаллические массивы) и современные осадочные породы: грубообломочные — глыбы, валуны, камни, галька, щебень; сыпучие — гравий, хрящ, песок; связные — илистый песок, песчаный ил, ил, глинистый ил. Современные биогенные отложения подразделяются на ракушечный песок, коралловый песок, ракушку, кораллы, мшанку и т. д.; особое внимание отводится конкрециям — минеральным образованиям шарообразной формы диаметром 1—25 см. Конкреции в основном состоят из оксидов железа и марганца.

При исследовании грунтов их различают также по цвету и оттенку, консистенции (степень подвижности, густоты вещества), пластичности (способность изменять форму под влиянием внешнего воздействия и сохранять эту форму после его прекращения), текстуре (особенности строения, обусловленные ориентированием и пространственным положением частиц).

Изучение процессов осадкообразования в Мировом океане, состава, свойств, стратиграфии и закономерностей распределения осадков, освещение вопросов их геологического строения и истории развития необходимо не только для комплексного исследования всех процессов, происходящих в Мировом океане, но и для различных нужд морского промысла, навигации, решения некоторых задач гидротехнического и портового строительства. Знание процессов осадкообразования важно также для правильного понимания условий образования осадочных пород и связанных с ними полезных ископаемых — железомарганцевых и полиметаллических конкреций, россыпей тяжелых металлов на шельфе, хромовых руд в рифтовых долинах, для выявления нефтеносных структур и для ряда других практических вопросов.

Исследования в области геологии моря повышают знания о строении земной коры, а следовательно, способствуют выявлению распределения полезных ископаемых. Кроме того, они показывают, насколько тесно связана геология моря с гео- и гидрохимией, гео- и гидрофизикой, а также с целым рядом смежных наук. Решение подобных проблем требует развития новых, совершенных методов исследований и методов разведки в области геологии моря.

## 10.2. История исследований грунта дна

Отдельные сведения о море и строении его дна встречаются уже в работах древних греческих и римских ученых. Еще в 40—20 гг. до н. э. древнегреческий географ Страбон, а позднее, в I в. н. э., римский философ Сенека указывали на то, что горные породы, разрушаясь, уносятся в море и откладываются в его прибрежной зоне.

Через пять лет после первого кругосветного плавания Магеллана в 1527 г. в Испании появилась первая морская карта, на которой крестиками и точками были обозначены мели и рифы. А результаты попутных наблюдений за грунтами дна позволили к концу XVI в. издать целый атлас морских карт. В то время исследование грунтов было в основном предназначено для обеспечения безопасности мореплавания (мели, банки, якорные стоянки).

Принято считать, что первую попытку получить образцы грунта с помощью лота с отделяющимся грузом и трубкой, набитой салом, предпринял мичман американского флота Брук в 1853 г. Но, как указывает в своей книге «Физическая география моря» известный океанограф Мэтью Фонтейн Мори, идея создания подобного прибора для взятия проб грунта принадлежит Петру I (1715—1717 гг.): «Честь первой попытки достать образцы морского дна с большой глубины принадлежит Петру Великому. Этот замечательный государь придумал особый зонд для промеров в Каспийском море. Снаряд состоял из пары крючьев с грузилом, приложенным таким образом, что при первом ударе о морское дно грузило соскакивало, а крючья возвращались с куском захваченной ими земли».

Первая сводка данных о грунте дна материковой отмели европейских морей выполнена французским инженером Деллейем (1871 г.). Сводка данных о грунтах в Мировом океане была выполнена Дж. Мерреем и Ренаром (1891г.), обрабатывавшим сборы грунта экспедиции на «Челленджере» и многих других. Кстати, Меррею были переданы многочисленные образцы, собранные Н. И. Андрусовым в Черном море в 1890—1891 гг. Сам Андрусов использовал эти материалы для обоснования геологической истории Черного моря.

Деллей, Меррей и Ренар классифицировали грунты и пытались установить закономерности их распределения на дне в зависимости от глубины, удаления от берегов и т. п. Французский океанограф Туле классифицировал грунты по результатам механического анализа. Академики Н. И. Андрусов и А. Д. Архангельский обратили внимание на напластование (стратификацию) морских отложений. Они исследовали грунты с целью изучения нефтяных месторождений и поиска многих редких элементов. Исследования профессора М. В. Кленовой установили полную зависимость механического состава грунтов от рельефа дна, с одной стороны, и от общей гидродинамической активности вод — с другой. Первую попытку установить зависимость разнообразия состава наносов морского дна и их распределения от характера и направления течений предпринял Мори



на основании материалов наблюдений, выполненных в экспедиции на «Челленджере». Но полная картина зависимости механического состава грунтов от рельефа дна и общих гидродинамических характеристик вод не раскрыта и до сих пор.

До начала XX в. геологические исследования в Мировом океане в основном проводились с помощью лотов типа предложенных Петром I и Бруком. В 1905 г. появилась ударная грунтовая трубка Экмана, позволявшая добывать колонки образцов грунта сначала длиной около 1 м, а затем и более. В 1927 г. была создана большая грунтовая трубка Убеко-Чернава (Управление по обеспечению безопасности кораблевождения на Черном и Азовском морях), благодаря которой стали получать колонки грунта до 5 м. В начале 40-х годов в Швеции появилась первая гидростатическая грунтовая трубка для отбора колонок грунта высотой 10 — 15 м, а позднее с помощью модификаций — свыше 30 м. Все это дало возможность изучать донные осадки на разных глубинах и в различных районах Мирового океана.

### 10.3. Возможности исследования донных грунтов

В зависимости от поставленных задач морских геологических исследований, особенностей рельефа дна и своеобразия донных отложений для их изучения используются различные устройства, объединенные общим термином — *грунтодобывающие приборы*.

На глубинах до 200—300 м для получения образцов грунта с каменистого дна (обломки коренных пород, валуны, галька, гравий) и с целью добычи различных видов донной фауны используются *драги* и *донные тралы*. Драгирование и траловые работы производятся на самом малом ходу судна. Для предотвращения вымывания через ячей траловой дели мягкого илистого грунта вместе с содержащимся в нем микробентосом во время подъема с большой глубины используется трал сшитым в его концевую часть мешком из редкой ткани, пропускающей воду, но задерживающей грунт и мелкую живность. Драга представляет собой прямоугольную продолговатую раму, к которой крепится мешок из плотной материи. Рама на длинных (горизонтальных) сторонах снабжена наклонными стальными ножами, расходящимися вперед и наружу. За короткие боковые стороны драги укреплен железная дуга, к середине которой прикрепляется буксирный трос, толщина которого зависит от размеров драги и глубины драгирования.

На глубинах до 5 м пробы рыхлых грунтов можно получить *шупом* или *металлическим стаканом*, укрепленным на конце наметки.

На глубинах более 5 м пробы рыхлых грунтов берут с помощью *дночерпателей* и *грунтовых трубок*.

Дночерпатели используются для отбора проб поверхностного слоя донных осадков и фауны. Глубина их проникновения в грунт не превышает 35—40 см. Дночерпатели изготавливаются в виде тяжелых ковшей или шарнирно соединенных металлических створок.

При достижении дна створки врезаются в грунт. При подъеме дночерпателя под влиянием собственной тяжести или специального механизма створки закрываются, вырезав образец грунта, а давление воды прижимает крышки и тем самым предохраняет пробу от вымывания. Наша промышленность выпускает дночерпатели «Океан-50», имеющие одинаковое устройство, но различные размеры. Они бывают трех видов:

а) с площадью захвата  $0,1 \text{ м}^2$  и массой 30—50 кг;

б) с площадью захвата  $0,25 \text{ м}^2$  и массой 125 кг;

в) с площадью захвата  $0,4 \text{ м}^2$  и массой 175—200 кг.

Грунтовые трубки используются для получения колонок грунта дна длиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров. Добытые с их помощью колонки грунта наглядно характеризуют состав донных осадков. Различают ударные, поршневые, вибропоршневые и гидростатические грунтовые трубки.

Ударные грунтовые трубки наиболее просты по конструкции и углубляются в грунт под действием собственной массы и скорости падения. Недостатком подобных трубок является то, что длина колонок грунта в них всегда меньше углубления трубки в грунт из-за сил внутреннего трения, развивающихся при уплотнении и заклинивании осадков. Среди большого разнообразия ударных трубок можно отметить несколько типов.

Грунтовая трубка ГОИНа предназначена для отбора колонок грунта с любой глубины (рис. 10.1). Ее длина может быть 1 и 1,5 м, а масса соответственно 18,5 и 19 кг.

Трубка состоит из колонковой стальной трубы (2) с вставленным в нее разъемным тонкостенным латунным вкладышем (8). Клапан (6) служит для закрывания верхнего отверстия трубки при ее подъеме, что предохраняет отобранную пробу от вымывания. На нижнюю часть трубки навинчен стальной наконечник (1) с острыми краями для облегчения вхождения трубки в грунт. На верхнем конце трубки размещен груз (7) со стабилизатором (3) для большей массы и придания прибору вертикального положения при опускании. Для подсоединения трубки к тросу используется скоба (5) с крюком (4).

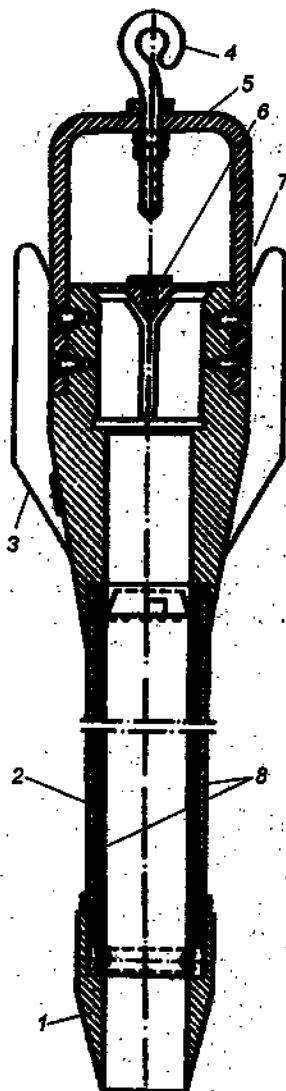


Рис. 10.1. Грунтовая трубка ГОИНа.

Усл. обозначения см. текст.

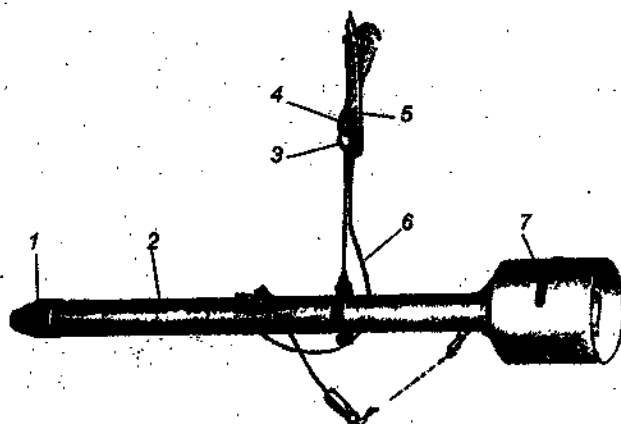


Рис. 10.2. Трубка для взятия проб грунта на ходу судна.

1 — наконечник; 2 — труба; 3 — кольцо трюска; 4 — крюк-обработчик; 5 — обойма; 6 — трюски; 7 — цилиндрическая муфта.

Трубки для взятия проб грунта на ходу судна (ПЕ-27) (рис. 10.2) разработаны в ГОИНе и предназначены для взятия колонок грунта дна в дрейфе и на ходу судна (до 15 узлов). Выпускаются два типа подобных трубок: легкая (ТНХ-Л) массой 16 кг и тяжелая (ТНХ-Т) массой 26 кг. Они позволяют отбирать колонки грунта длиной до 1 м на глубинах до 800 м.

Трубка состоит из толстостенной стальной трубы (2) с навинченным наконечником (1) с острыми краями. Внутри трубы расположен вкладыш, состоящий из двух половинок. Трубка опускается в горизонтальном положении, подвешенная на тросе с помощью специального устройства, срабатывающего при ударе о грунт. При подъеме трос, натягиваясь, закрывает крановое устройство, находящееся в конце трубки внутри широкого кольцевого стабилизатора. Необходимую длину вытравленного троса можно рассчитать по формуле

$$S = H(1 + V/4),$$

где  $S$  — длина вытравленного троса, м;  $H$  — глубина места, м;  $V$  — скорость судна, м/с.

Грунтовая трубка «Gemini Twin corer», разработанная в финском Институте морских исследований и предназначенная для отбора проб мягких донных отложений, представляет собой двойную стальную трубу (рис. 10.3) с внутренним вкладышем из оргстекла с внутренним диаметром 80 мм; снабжена хорошо развитым стабилизатором. Прибор позволяет отбирать колонки грунта до 1 м с четкой границей между верхним слоем грунта и придонной водой, что дает возможность отбирать пробы придонной воды на гидрохимический анализ. В конструкции вкладыша предусмотрена возможность легко отрезать от отобранной колонки пробы разной высоты.

Поршневые трубки также углубляются в грунт под действием силы падения. После этого они дополнительно углубляются за счет вакуума, создаваемого при вытягивании поршня тросом. Поршневые трубки берут колонки грунта, длина которых равна их углублению в

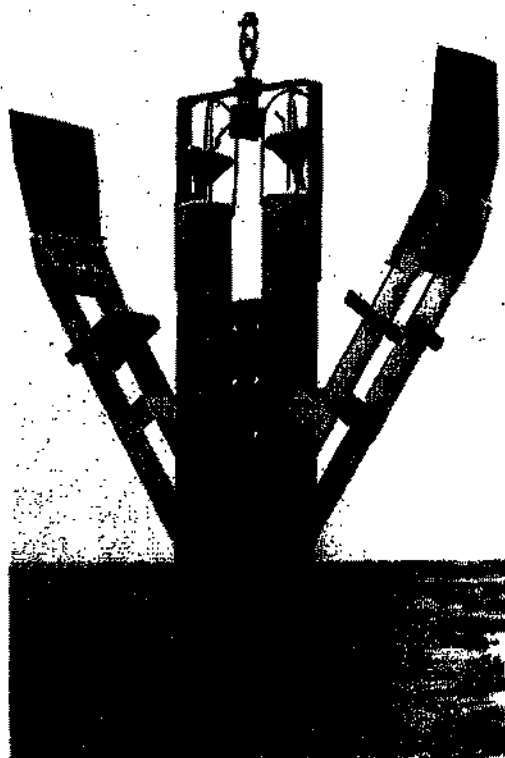


Рис. 10.3. Грунтовая трубка «Gemini Twin corer».

толщину осадков и может достигать длины более 20 м с незначительным нарушением стратификации пробы.

В качестве примера можно привести *поршневую грунтовую трубку ПГТ-56*, разработанную в ИО РАН (рис. 10.4). Колонковая трубка (7) с внутренним диаметром 50—60 мм составлена с помощью муфт со штыковым или резьбовым сцеплением из нескольких секций по 7,5—8 м длиной. Обтекаемой формы разборный груз (6) массой до 250 кг размещен в верхней части трубки. На нижний конец колонковой трубки навинчивается наконечник с острыми краями и лопастным клапаном. На верхнем конце трубки размещено оголовье (4) для ее подвешивания на короткое плечо стального коромысла-сбрасывателя (5). Груз-разведчик (10), подвешенный на тросе к длинному плечу коромысла и расположенный при спуске трубки на 5—6 м ниже наконечника, удерживает коромысло вместе с трубкой в горизонтальном положении. Коромысло через серьгу (3) и

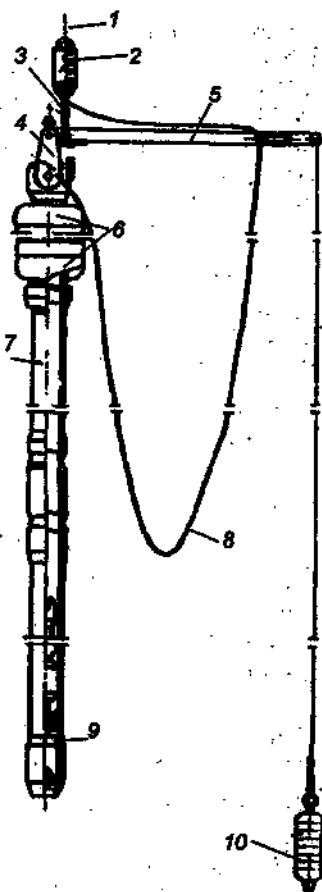


Рис. 10.4. Поршневая грунтовая трубка ПГТ-56.

Усл. обозначения см. текст.

скобу соединено с тросовым зажимом (2), закрепленном на тросе (1) на расстоянии, равном длине колонковой трубки плюс 5—6 м от конца троса, прикрепленного к поршню (9). Этот поршневой конец (8) проходит по всей длине грунтовой трубки и соединен с поршнем, имеющим уплотнение в виде резиновых или кожаных манжет, и системой откидывающихся зубов. При опускании грунтовой трубки, как только груз-разведчик достигнет дна, нагрузка с длинного плеча коромысла-сбрасывателя снимается, трубка соскакивает с короткого плеча коромысла и, свободно падая, углубляется в грунт дна, при этом поршневой трос вытягивается во всю длину, а поршень остается у поверхности дна. Таким образом, поршневая трубка берет колонку грунта со всей глубины своего погружения.

*Вибропоршневые грунтовые трубки* предназначены в основном для отбора проб грубозернистых осадков в прибрежной зоне на глубинах до 150 м. Подобная трубка, разработанная в ИО РАН, имеет длину 4,5 м. В нижней части трубки расположена специальная платформа для установки прибора на дно. По бокам колонковой трубки расположены две направляющие трубы, по которым перемещается каретка. На каретке установлен электромеханический вибратор в виде электромотора трехфазного тока мощностью 3 кВт, на оси которого закреплены эксцентрики. Вибратор, находящийся в герметичном корпусе, соединен с помощью шарниров с колонковой трубкой. При работе электромотора вибрация через каретку передается колонковой трубке, которая под этим воздействием и заглубляется в грунт, при этом каретка с вибратором перемещается вместе с трубкой вниз по направляющим. Поршень, находящийся внутри трубки, во время работы остается на уровне поверхности дна, что обеспечивает получение неискаженных колонок грунта. Во внутренней части наконечника, навинченного на нижнюю часть колонковой трубки, имеется многолестковый пружинящий клапан, предотвращающий выпадение грунта при подъеме трубки.

*Гидростатические грунтовые трубки* предназначены для отбора длинных, до 40 м, с ненарушенной слоистостью, колонок донных осадков. Эти трубки снабжены дополнительным баллоном. Часть его внутреннего объема, равная объему колонковой трубки, заполнена воздухом, остальная часть — водой. При углублении трубки в толщу осадков давлением открывается специальный кран для сообщения полости баллона с полостью колонковой трубки. Возникающая разность давлений (гидростатическое на дне и атмосферное в полости) заставляет трубку вонзаться в грунт и заполняться грунтом. Таким образом, гидростатическая трубка сначала работает как ударная, а затем как гидростатическая.

В качестве примера можно привести *глубоководную гидростатическую грунтовую трубку (ГГГТ)*, разработанную в ИО РАН (рис. 10.5). ГГГТ состоит из толстостенного стального баллона (6) емкостью 75 л, рассчитанного на давление более 1000 атм, кранового устройства (7) и колонковой трубки (8) сечением 72×60 мм. Колонковая трубка состоит из соединенных штыковыми или резьбовыми

муфтами (9) секций длиной по 9 м. На нижний конец трубки навинчивается наконечник (10). Трубка подвешивается на короткое плечо (4) стального коромысла-обрасывателя, а далее через серьгу (3) и скобу с помощью тросового зажима (2) крепится к несущему тросу (1) на расстоянии, равном длине колонковой трубки с баллоном плюс 5—6 м от конца троса. Эта слабина троса укладывается вокруг оголовья (5) трубки и закрепляется там. К длинному концу коромысла подвешивается груз-разведчик (11) на 5—6 м ниже наконечника. При достижении грузом-разведчиком дна трубка соскальзывает с короткого плеча коромысла и углубляется в грунт. Под действием давления открывается крановое устройство (7) и срабатывает эффект дополнительного баллона. Гидростатические трубки собираются и подготавливаются к работе на специальной металлической раме, прикрепленной к наружному борту судна.

Грунтодобывающие приборы позволяют поднимать образцы грунта и всесторонне исследовать их свойства, но возникающая при этом дискретность отбора не дает полной картины распределения грунтов на океанском дне. Кроме того, получение информации возможно лишь о поверхностном слое грунтов. Поэтому возникает необходимость использования других, косвенных методов исследования донных грунтов — фото- и видеосъемки, акустических и геофизических методов.

*Подводная фотосъемка* и главным образом *стереофотосъемка* позволяют исследовать микрорельеф и структуру донных отложений на любых глубинах. Тем же целям служит и подводная видеосъемка, ее преимуществом является возможность получения непрерывной информации в полосе следования судна или глубоководного аппарата.

В основу *акустических методов* положено различие в скорости распространения звука и звукоотражательной способности грунтов, а также различие в рассеянии звуковой энергии неровностями дна и неоднородностями в толще донных отложений. Каждый вид грунта имеет стабильную в довольно узких пределах характеристику отражения звуковых волн, отличную от других видов. Имея набор эталонных импульсов, полученных при обследовании эхолотами участков дна с известными грунтами, можно опознать грунт по форме отраженного дном и принятого сигнала, сравнив его с эталоном. Правда, при этом характер отраженных импульсов зависит от многих причин (параметры эхолота, геологическое строение дна, плотность морской воды), зачастую не поддающихся точному учету или



Рис. 10.5. Глубоководная гидростатическая грунтовая трубка ГГТ.

Угол обозначения см. текст.

непрерывно изменяющихся. Все это может приводить к значительным погрешностям при определении грунтов данным методом.

Для исследования донных отложений используется также метод звуковой геолокации. Сущность его заключается в том, что возбуждаемые в воде мощные импульсы упругих колебаний звуковой частоты достигают грунта и отражаются от него подобно импульсам эхолота. Но при этом часть энергии проникает в поверхностный слой грунта и в случае достаточно мощного акустического импульса полностью здесь не поглощается. На границе со слоем другого вида грунта происходит вторичное отражение, а оставшаяся энергия позволяет звуковому импульсу подойти к границе следующего слоя. Отраженные от дна и слоев грунта импульсы регистрируются на эхограмме в порядке их поступления.

Геофизические методы используются для более глубокого исследования характера и структуры осадочных и изверженных пород. Наиболее широко применяются сейсморазведка, гравиметрическая и гидромагнитная съемки, а также электропрофилирование. Их комплексное применение позволяет установить структуру и плотность донных отложений.

## Глава 11

### МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТБОРА ПРОБ МОРСКОЙ ВОДЫ

#### 11.1. Методы отбора проб воды

Отбор проб воды для гидрофизических и гидрохимических исследований, как правило, производится на всех океанографических станциях. При этом главным требованием является: взятие пробы точно с заданного горизонта и предохранение ее от перемешивания с водой других слоев, от испарения и от химического воздействия используемого для отбора пробы устройства и посуды, предназначенной для ее хранения. Неправильный отбор проб приводит к ошибочным результатам анализа, причем эти ошибки в дальнейшем нельзя исправить.

Существует методологическое различие отбора проб воды из тонкого поверхностного слоя (толщина от нескольких микрометров до 1—2 см), берущихся специальными приборами, и с различных горизонтов, включая поверхностный слой толщиной не более 1 м, где пробы могут браться ведром, плантом или батометром.

Способы отбора проб морской воды на химический анализ определяются задачами исследований, концентрациями и особенностями распределения химических веществ. Взятие проб морской воды производится двумя основными способами — плантовым и батометрическим. Плантовый способ используется сравнительно редко. Он предназначен для получения проб большого объема и на небольших глубинах. Сущность его заключается в использовании насоса, с помощью которого по длинному плану, опущенному на заранее заданный горизонт, вода подается на борт судна. В последнее время при использовании буксируемых измерительных систем стал применяться отбор проб воды с помощью электропомпы и передача ее на борт судна по тefлоновому плану с внутренним диаметром 8—10 мм, помещенному внутри кабель-троса. Подобная методика отбора проб воды, по-видимому, найдет широкое применение, особенно при буксировке носителя по синусоидальной (паллообразной) кривой.

Необходимые объемы проб воды определяются видами исследований, предусмотренными программой работ экспедиции. Так, для определения солености воды и концентрации растворенного кислорода объем пробы воды с одного горизонта должен быть не менее  $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ . При выполнении стандартного комплекса гидрохимических определений (соленость, кислород, pH, щелочность, биогенные элементы) объем пробы должен быть не менее  $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . При исследовании химических загрязнений объем пробы не должен быть менее 7—10 л, а при определении радиоактивности воды объем пробы составляет уже 50—200 л.



Пробы воды из поверхностного слоя моря обычно берутся чистыми опинкованными, эмалированными или полиэтиленовыми ведрами. При определении химического загрязнения поверхности моря отбор проб производится в носовой части судна, где не сказывается загрязняемость поверхности моря судном, нефтепродуктами и другими отходами, причем не следует отбирать пробы на поверхности прямо в пятнах нефти. Пробы воды с глубинных горизонтов обычно отбираются батометрами, которые представляют собой цилиндрические сосуды с закрывающимися под водой на заданном горизонте крановыми затворами или крышками.

В океанологической практике встречаются опрокидывающиеся и неопрокидывающиеся батометры различного объема. Опрокидывающиеся батометры кроме отбора проб позволяют измерять температуру воды с помощью глубоководных опрокидывающихся термометров, установленных в специальных оправках на батометрах. Неопрокидывающиеся батометры в основном предназначены для отбора проб воды, правда, в некоторых конструкциях предусмотрены опрокидывающиеся оправки для термометров. Батометры опускают открытыми на заданные горизонты с борта судна с помощью лебедок на тросе. Поэтому при их опускании вода верхних слоев в них не задерживается. Необходимо следить за герметичностью закрытия батометров и за окисляемостью их внутренней поверхности.

Наиболее широко используемыми у нас являются серийно выпускаемые батометры БМ-48 (прообразом которых являлся батометр Ф. Нансена); батометры системы Ю. К. Алексеева, разработанные в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте, предназначенные для работы с маломерных судов, и некоторые другие. Широко используются и механические автоматические батометры-батитермографы, например типа ГМ-7-111, предназначенные для автоматической регистрации температуры воды по глубине и взятия проб воды на стандартных горизонтах с борта судна. В последнее время в океанологическую практику все больше входят кассеты батометров различных объемов механического и электронного типов.

## 11.2. Приборы и устройства для отбора проб воды

*Батометр морской БМ-48* (рис. 11.1) предназначен для взятия проб воды с различных глубин с одновременным измерением температуры воды исследуемого горизонта с помощью глубоководных опрокидывающихся термометров. Он представляет собой латунный цилиндр емкостью 1 л, длиной 650 мм с крановыми затворами и целевыми отверстиями длиной 60 мм и шириной 12 мм на обоих концах, кронштейнами для крепления двухпенальной рамы с термометрами, зажимным устройством батометра и спусковым механизмом. Зажимное устройство состоит из основания, планки, прижимаемой к основанию барашковым винтом, и механизма крепления посылного грузика, представляющего собой рычаг с крючком, конец которого входит в запил основания. Гидрологический трос пропус-

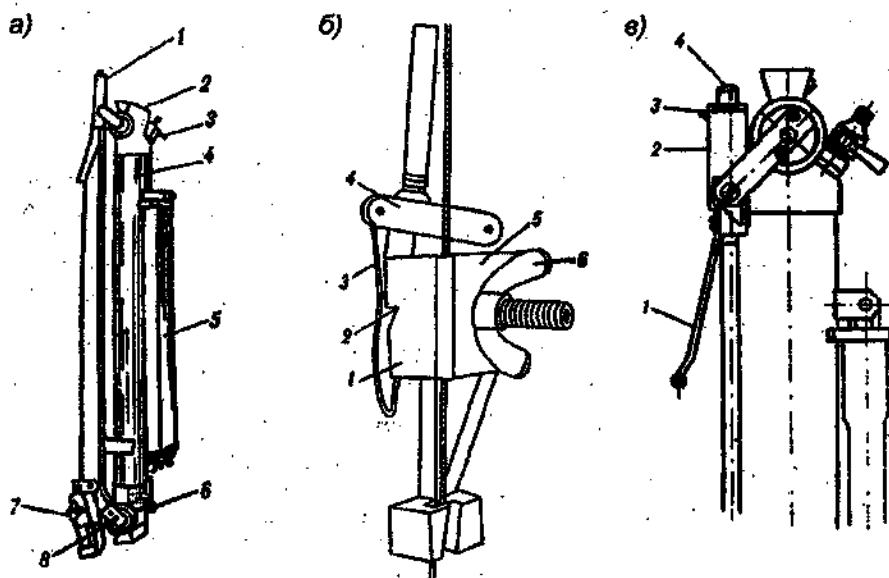


Рис. 11.1. Батометр морской БМ-48.

*a* — общий вид: 1 — спусковой механизм; 2 — щелевидные отверстия; 3 — кран; 4 — латунный цилиндр; 5 — двухплечевая рама для термометров; 6 — пробка; 7 — зажимное устройство; 8 — краевые сальники.

*б* — зажимное устройство: 1 — основание; 2 — зацеп основания; 3 — крючок; 4 — рычаг; 5 — планка; 6 — барашковый винт.

*с* — спусковой механизм: 1 — пластинчатая пружина; 2 — втулка; 3 — крючок; 4 — плунжер.

кается между планкой и основанием и зажимается барашковым винтом. Посыльный грузик крепится к устройству на проволоочном поводке с петлей, которая насаживается на верхний конец крючка в зацеп основания. Крючок поддерживается в верхнем положении рычагом, имеющим плоскую пружину.

Спусковой механизм представляет собой так называемое байонетное устройство, состоящее из втулки с продольным пазом, который переключается в верхней части крючком, скрепленным с плунжером, удерживаемым в верхнем положении спиральной пружиной, заключенной во втулке. Байонетное устройство служит для удержания батометра у троса, что достигается заведением троса под крючок плунжера, и для освобождения верхнего конца батометра от зацепления с тросом при ударе посыльного грузика о плунжер.

К нижней части спускового механизма прикрепляется пружина пластинчатого типа для повышения устойчивости положения прибора. Все части батометра, за исключением пружин и прокладок, изготавливаются из латуни.

Перед подвешиванием к тросу батометр нужно привести в рабочее положение: вставить в оправу глубоководные термометры, закрыть сливной кран и завинтить до отказа воздушный клапан, открутить барашек на зажиме троса и открыть краевые отверстия. Затем батометры для работы закрепляются на тросе. Если батомет-

ры опускаются в воду сериями, то начиная со второго батометра (так как первым подвешивается концевой батометр) на крючок зажимного устройства подвешивают посыльный грузик, который в свою очередь надевают на трос.

Морской батометр системы Ю. К. Алексеева является более легким по сравнению с БМ-48 и поэтому более удобным для применения на малых судах. Он представляет собой латунный цилиндр объемом 220 см<sup>3</sup>, закрывающийся плоскими крышками с латунными прокладками. Внутри корпуса батометра проходит пружина, предназначенная для захлопывания крышек в момент срабатывания батометра и удержания в нем взятой пробы воды. Пара глубоководных термометров помещена в специальной оправе, которая расположена сбоку цилиндра и снизу укреплена на шарнире, а сверху удерживается специальной защелкой. При ударе посыльного грузика о пружинную защелку срабатывает спусковой механизм и освобождает оправу с термометрами. Последняя опрокидывается под воздействием собственного веса вокруг шарнирного зажима, что позволяет крышкам батометра захлопнуться.

Батометр ГМ-42 разработан НИИ ГМП, выполнен целиком из нержавеющей стали (рис. 11.2) и позволяет отбирать пробы воды объемом до 54 л с разных глубин. Он представляет собой полый цилиндр (9) диаметром 250 мм и длиной 1100 мм, с массой без воды 25 кг. На обоих концах цилиндра расположены откидные крышки (10) с резиновыми прокладками в виде дисков для обеспечения герметичности. Болтами по бокам крышек прикрепляются концы тросов (4), которые затем пропускаются через скобки (11) и с помощью огонов с коушами через общее кольцо присоединяются к крюку размыкающего устройства. Захлопывающий крышки и поддерживающий их в закрытом положении трос (3) пропущен через ролики (1) и

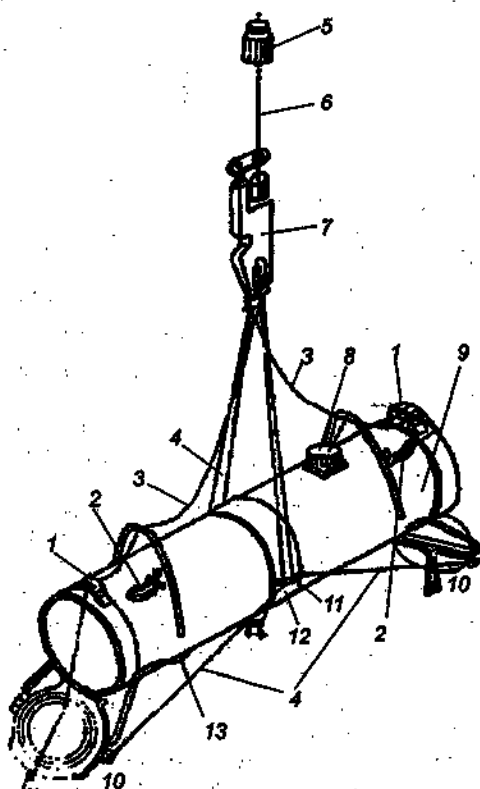


Рис. 11.2. Батометр ГМ-42.

1 — ролики; 2 — накладные болты; 3 — тросы управления крышками; 4 — концы тросов; 5 — посыльный грузик; 6 — трос подвески батометра; 7 — размыкатель; 8 — крышка воздушного отверстия; 9 — полый цилиндр; 10 — откидные крышки; 11 — скобки; 12 — хомутки; 13 — клапан сагва воды.

Батометр ГМ-42 разработан НИИ ГМП, выполнен целиком из нержавеющей стали (рис. 11.2) и позволяет отбирать пробы воды объемом до 54 л с разных глубин. Он представляет собой полый цилиндр (9) диаметром 250 мм и длиной 1100 мм, с массой без воды 25 кг. На обоих концах цилиндра расположены откидные крышки (10) с резиновыми прокладками в виде дисков для обеспечения герметичности. Болтами по бокам крышек прикрепляются концы тросов (4), которые затем пропускаются через скобки (11) и с помощью огонов с коушами через общее кольцо присоединяются к крюку размыкающего устройства. Захлопывающий крышки и поддерживающий их в закрытом положении трос (3) пропущен через ролики (1) и

прикреплен болтами сверху крышек. Огон с коушем на конце троса (6) с помощью такелажной скобы неразъемно присоединен к размыкающему устройству (7), представляющему собой планктонный вертикальный размыкатель ПВР-60, разработанный в ИО РАН.

Батометр опускают в воду с открытыми крышками, которые тросами (4) прижимают их к ножкам батометра, при этом трос (3) находится в ненапрянутом состоянии.

Посыльный грузик (5) массой 800 г опускается по тросу (6) и ударяет по штоку размыкающего устройства, что освобождает систему тросов (4), а сам батометр под действием собственного веса опускается несколько вниз и натягивает трос (3), при этом закрываются крышки батометра. Слив воды производится через клапан (13) с помощью специального сливного устройства, а доступ воздуха в батометр достигается вращением крышки (8) воздушного отверстия.

Батометр для взятия проб на загрязнение (рис. 11.3) представляет собой пластмассовый цилиндр (5) емкостью 7 л, диаметром 120 мм, длиной 595 мм с системой закрытия, которая крепится к корпусу батометра хомутами (3). Система закрытия состоит из крышек (2) с резиновыми прокладками (1) и штудерами (15) (для выпуска воздуха в батометр) и (6) (для слива пробы). Крышки батометра приводятся в действие тягами (8) с помощью резиновых тяжей (11).

Рабочее положение батометра (с открытыми крышками и натянутыми на ролики (12) резиновыми тяжами) фиксируется зацеплением зуба (10) с пазом на кулисе (9). Батометр крепится к тросу с помощью зажимного устройства, как у батометра ВМ-48, при этом его поддерживают за ручку (13). Посыльный грузик ударяет по штоку (14), который, двигаясь вниз, выводит из зацепления зуб (10), и тяги (8) под действием резиновых тяжей закрывают крышки батометра. После этого шток (14) возвращается в исходное положение с помощью упругой резиновой пластины (4). Для срабатывания последующего батометра предусмотрено приспособление (7) для подвески посыльного грузика.

В последнее время нашли широкое применение морские батометры Нискина (рис. 11.4). Батометры цилиндрической формы изготовлены из пластмассы, что в значительной степени

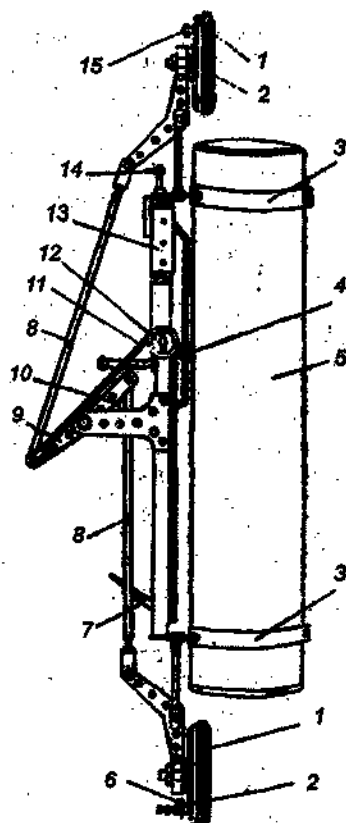


Рис. 11.3. Батометр для взятия проб на загрязнение.

Усл. обозначения см. текст.

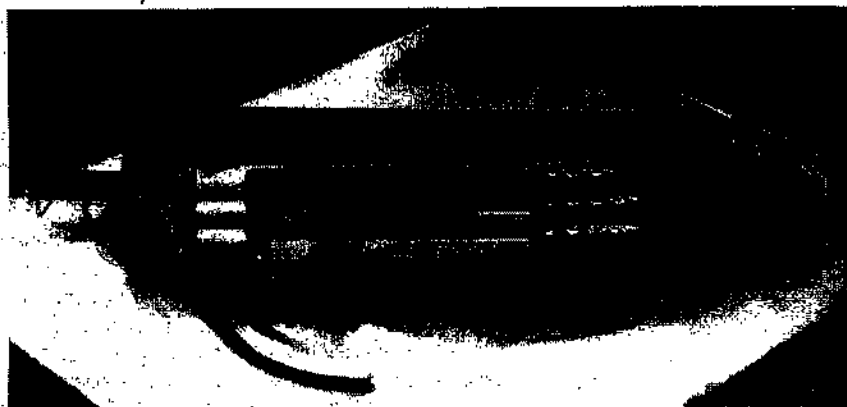


Рис. 11.4. Батометр Нискина.

уменьшает их вес, экономит цветной металл. Кроме того, пластмассовые батометры не подвергаются коррозии и в меньшей степени подвержены обрастанию. Батометры снабжены откидными крышками с прокладками с обеих сторон цилиндра. Первые батометры Нискина предназначены для выполнения гидрологических серий при производстве океанографических станций. Для этой цели батометры снабжены трехпенальными рамами для глубоководных опрокидывающихся термометров и термометров-глубомеров, зажимным устройством для подвешивания батометра на трос и спусковым устройством. При ударе посыльного грузика о спусковое устройство освобождаются тяги, удерживающие откинутые подпружиненные крышки батометра, которые при этом захлопываются, и затвор подпружиненной трехпенальной оправы, переворачивающейся после этого вместе с термометрами.

**Батометр-батитермограф ГМ-7-111** (рис. 11.5) предназначен для автоматической регистрации температуры воды, глубины погружения прибора и взятия проб воды на стандартных горизонтах о борта судна. Прибор состоит из термоблока, батиблока, восьми батометров для отбора проб и корпуса с механизмом закрывания батометров на заданных горизонтах.

#### Основные технические характеристики

|                                                  |                                   |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Диапазон измерения температуры воды, °C .....    | -2...30                           |
| Погрешность измерения температуры воды, °C ..... | ±0,1                              |
| Измерение глубины погружения прибора, м .....    | 2—200                             |
| Погрешность измерения глубины погружения прибора |                                   |
| до 30 м .....                                    | ±1 % от глубины                   |
| свыше 30 м .....                                 | ±3 % от глубины                   |
| Горизонты отбора проб воды, м .....              | 10, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200 |
| Погрешность глубины отбора проб воды .....       | 1,5±0,03 м глубины                |
| Объем батометров, м <sup>3</sup> .....           | 0,1·10 <sup>-3</sup> ±5           |
| Масса, кг .....                                  | 15                                |

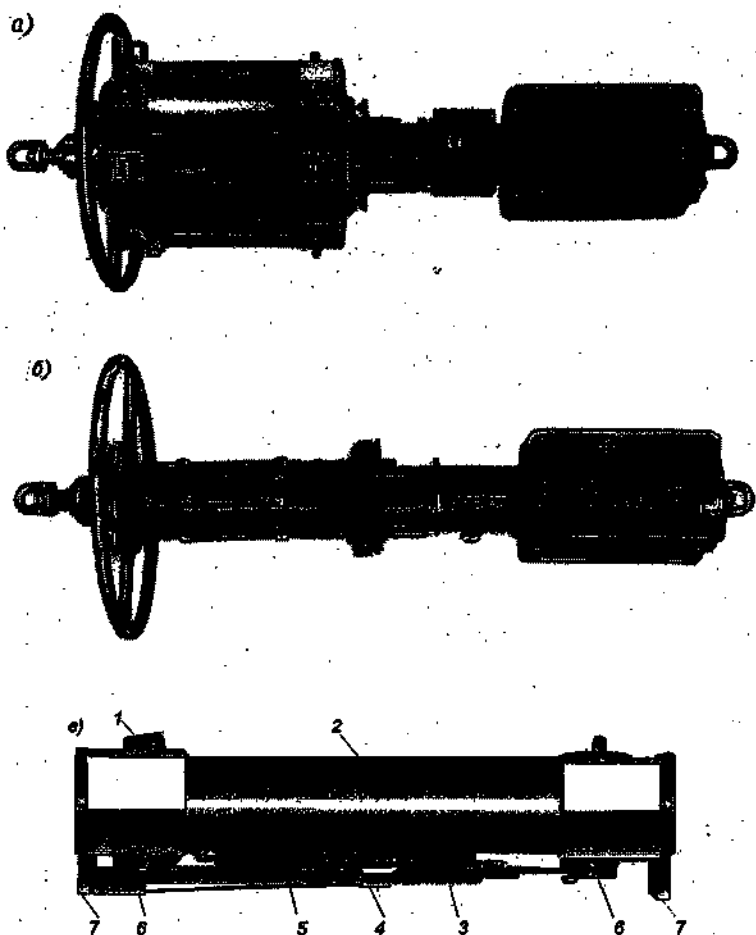


Рис. 11.5. Батометр-батитермограф ГМ-7-111.

*a* — общий вид; *b* — прибор со снятыми батометрами; *c* — батометр.  
Усл. обозначения см. текст.

Устройство термо- и батиблока аналогично таковым в ГМ-9-111. Механизм закрывания батометров (рис. 11.5 *b*) состоит из двух фасонных колец (1), восьми подпружиненных штоков (2) различной длины, на которых укреплены специальные втулки с зубьями (3), и упорного кольца батиблока (4). Каждый батометр (рис. 11.5 *c*) представляет собой цилиндр (2) с двумя коническими затворными клапанами (6), связанными тягой (3), на которой расположен фиксатор (4). Тяга приводится в движение пружиной (5), прикрепленной одним концом к корпусу. Один из затворных клапанов снабжен ручкой (1). На обоих концах цилиндра имеются фланцы (7) для закрепления сосуда на фасонных кольцах.

Перед опусканием прибора затворные клапаны каждого батометра взводятся ручкой (1), при этом фиксатор (4) входит в зацепление с зубом втулки (3) (рис. 11.5 а). Поэтому при опускании через каждый батометр свободно проходит вода. При достижении первого заданного горизонта упорное кольцо (4), передвигаясь вместе со свободным концом батиблока, надавливает на самый длинный шток, продвигая его и освобождая фиксатор, что позволяет тяге батометра под действием пружины поворачивать затворные клапаны. Также срабатывают и все остальные батометры. Работа с прибором ГМ-7-111 может производиться как на стоянке, так и на ходу судна.

В настоящее время для отбора проб морской воды широкое распространение в океанографической практике нашли автоматические кассеты батометров механического и электронного типов. В качестве примера кассеты батометров механического типа можно привести *устройство для отбора проб воды (пробоотборник)*, разработанное в ЦКБ ГМП (Обнинск). Пробоотборник с гидростатическим управлением предназначен для отбора проб воды с борта судна или неподвижного основания. Пластмассовые батометры закрываются автоматически на предварительно заданной глубине в слое 10—200 м. Каркас с батометрами крепится на тросе диаметром 3—6 мм. Возможно индивидуальное (без каркаса) использование любого батометра. В основной комплект пробоотборника входят: четыре батометра с гидростатами — устройствами для фиксации глубины срабатывания батометров (захлопывание крышек батометров); каркас, обеспечивающий установку четырех батометров объемом 1 л; устройство для создания давления при калибровке гидростатов с возможностью подключения деформационного манометра при установке порога срабатывания гидростата. Точность срабатывания гидростата  $\pm 3\%$  от установленной глубины.

Как правило, автоматические кассеты батометров используются совместно с различного типа СТД-системами. Так, например, для СТД-системы «Гидрозонд» в ЦКБ ГМП группой под руководством Н. М. Скурихина была разработана *кассета батометров для отбора проб воды*. Устройство для взятия проб воды на заданных горизонтах состоит из цилиндрического полого основания, расположенных вокруг него батометров с пружинами для их закрытия, механизма управления и ограждения. Основание представляет собой тонкостенную трубу, внутри которой в верхней части размещается механизм управления, а в нижней — корпус зондирующего устройства при агрегатировании с ним. На наружной поверхности основания приварены в два ряда кронштейны для установки батометров, которые надеваются на штыри нижних кронштейнов и фиксируются на верхних кронштейнах пружинными защелками. При такой конструкции время на установку или снятие каждого батометра не превышает 5 с.

Механизм управления срабатыванием батометров содержит электромагнитный (соленоидный) шаговый двигатель, состоящий из электромагнита, храпового механизма и системы рычагов, размещенных в герметичном корпусе. Вал механизма управления через сальнико-

вое уплотнение выведен наружу корпуса. На валу укреплен диск с радиальной прорезью, а на периферии верхнего основания корпуса установлены на осях двулучные рычаги. При воздействии закрывающих пружин батометров на наружные плечи этих рычагов (через серыги и рычаги барабанов) внутренние плечи прижимаются к диску. Крышки батометров при этом открыты.

С поступлением электрических импульсов на электромагнит осуществляется пошаговое вращение диска. При этом радиальная прорезь на диске устанавливается поочередно над каждым из двулучных рычагов. Рычаг поворачивается, серыга рычага батометра соскакивает с него, и крышки соответствующего батометра закрываются. Электрические импульсы на электромагнит механизма управления поступают по кабелю через герморазъем из блока питания кондирующего устройства. Они формируются там либо автоматически по достижении СТД-системой заранее заданных горизонтов, либо по команде оператора, управляющего работой СТД-системы с борта судна.

В качестве материала для батометров был выбран стеклонанолненный поликарбонат «Дифлон-НКС», обладающий высокой механической прочностью, стабильностью всех характеристик, стойкостью к воздействию водных растворов минеральных солей и кислот окислителей, малым удельным весом. Поликарбонат пригоден для использования и в тропических условиях. Его можно обрабатывать на всех современных машинах для литья под давлением и подвергать механической обработке. Использование же батометров типа ВМ-48 (кассета батометров для СТД-системы «Зонд-батометр») ненадежно из-за конструктивных и технологических недостатков. Батометры изготовлены из латуни с внутренним антикоррозийным покрытием, которое нарушается в процессе эксплуатации. Его масса, равная 4,5 кг, ведет к увеличению массы всей кассеты и расходу цветного металла. «Хронической болезнью» ВМ-48 является ненадежная герметичность краповых затворов. В процессе эксплуатации приходится регулярно заниматься их притиркой. Но притирка совместно с отложением солей ведут к увеличению момента вращения крапов. Применение смазки крапов для уменьшения этого момента искажает химический состав пробы.

Батометр представляет собой цилиндр с системой рычагов и пружин, обеспечивающих герметичное закрытие крышек. На нижней крышке установлен кран для слива отобранной пробы воды, а на верхней — воздушный кран для уравнивания давления внутри и снаружи батометра при отборе проб на борту судна.

#### Основные характеристики кассеты батометров

|                                                                     |                    |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Максимальная глубина погружения, м .....                            | 6000               |
| Число батометров в кассете, шт. ....                                | 24                 |
| Объем батометров, м <sup>3</sup> , не менее .....                   | 1·10 <sup>-3</sup> |
| Минимальное время между закрытием двух соседних батометров, с ..... | 8                  |
| Габариты устройства (диаметр и высота), м .....                     | 0,74×0,8           |
| Масса устройства, кг .....                                          | 56,4               |



Широкое распространение с различными видами СТД-систем нашли кассеты батометров типа ROSETTE, выпускаемые фирмой «General Oceanics» (США) в разной модификации. Батометры этих кассет изготавливаются из поликарбоната с внутренним покрытием, отличаются простотой конструкции, надежностью и небольшой массой. Кассеты этого типа могут использоваться и в автономном режиме. Кассеты ROSETTE в вариантах на 12 или 24 батометра Нискина или типа GO-FLO выпускаются объемом 1,2; 1,7; 2,5; 5; 8; 10; 12; 20; 30 и 40 л. Батометры опускаются в воду с закрытыми клапанами для предохранения их внутренней поверхности от загрязнения при прохождении поверхностного слоя, открываются на глубине около 10 м, а затем герметично закрываются на определенной глубине.

Фирма «Sea-Bird Electronics» выпускает кассету типа SBE 32 CAROUSEL, которая функционально, в том числе и по числу батометров, полностью повторяя кассеты ROSETTE, имеет механизм для срабатывания батометров собственной разработки. Самая большая модель этой фирмы (24 батометра по 12 л) имеет высоту 1735 мм и диаметр по ограждению 1486 мм.

Фирма «Falmount Scientific» также выпускает подобные кассеты модели Sure Fire, но на 36 батометров несколько измененной конструкции объемом по 9 л и сравнительно небольших размеров (высота 2 м и диаметр 1,7 м).

Фирма TECHNICAL (Франция) выпускает пластиковые прозрачные батометры оригинальной конструкции NOEX. Батометры опускаются в закрытом состоянии, но с помощью центрального поворотного клапана вода засасывается внутрь. Эта фирма выпускает также большую кассету на 24 батометра NOEX объемом по 20 л и на 36 батометров типа BALL TRAP по 0,25 л. Эта же фирма выпускает кассету LET-GO для определения первичной продукции радиоуглеродным ( $^{14}\text{C}$ ) методом *in situ*. Система представляет собой комбинацию из прозрачных и черных сферических (есть вариант полусферических) батометров. В нижнюю полусферу или в нижний плоский диск вставлена пипетка, которая при закрывании батометра впрыскивает в его внутренний объем раствор  $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ . Система очень проста и позволяет ставить эксперимент, не вытаскивая пробы на палубу и не подвергая фитопланктон световому и температурному воздействию (шоку).

Предохранение морских металлических батометров от продуктов коррозии очень сложно. Эту задачу можно решить, изготавливая батометры целиком из материалов, не подвергающихся коррозии, или защищая антикоррозионными покрытиями их внутреннюю (рабочую) поверхность.

Первый этап защиты — изготовление корпуса и крышек батометра из пластмасс или коррозионно-устойчивых сплавов — стал возможным только в последнее время, когда цена этих материалов стала доступной для массового производства батометров. Чаще всего используется второй способ, т. е. внутренняя поверхность покрывается тонким слоем золота, никеля, хрома. В последние годы применяется покрытие тефлоном (фторопласт-4), полиэтиленом, полиметилметакрилатом, а также различными смолами или лаками.

### 11.3. Отбор проб воды из тонкого поверхностного слоя

Отбор проб воды из тонкого поверхностного слоя (ТПС) становится в последнее время насущной задачей, так как этот слой занимает особое положение в экологической системе моря. Структура и химический состав ТПС зависят от внешних физических параметров (волнение, ветер, температура); от биологической продуктивности и условий загрязнения, т. е. широко меняются по всей акватории Мирового океана. В процессе испарения воды ТПС обогащается солями, что приводит к повышению солёности и развитию микроконвекции до глубины нескольких сантиметров. Однако вертикальная структура этого микрослоя сохраняется, поскольку органическое вещество, широко представленное в поверхностном слое, постоянно проявляет тенденцию к всплытию на поверхность. Существование поверхностных органических пленок оказывает определенное воздействие на газо-, соли- и теплообмен моря с атмосферой, а также обуславливает своеобразный гидрохимический режим ТПС. Задачи исследования химического состава ТПС требуют использования методов, позволяющих отбирать пробы воды из возможно более тонкого поверхностного слоя, толщина которого не превышает 1—2 см. В противном случае проба ТПС сильно разбавляется подповерхностной водой, что не позволяет выявить характеристики тонкого поверхностного слоя.

Известно устройство для отбора проб жидкости из ТПС в виде укрепленного на поплавках тefлонового валика, который, медленно вращаясь, соприкасается с водной поверхностью. Адсорбированный на поверхности валика слой удаляется скребком и попадает в приемник.

Иногда используется также устройство в виде планга — батометра или бактерионейстона-собирателя типа ампулы с открытыми концами. Недостатком подобных пробоотборников является невозможность установить толщину слоя воды, из которого отбирается проба.

В Российском государственном гидрометеорологическом университете разработано специальное устройство для отбора проб воды из тонкого поверхностного слоя (рис. 11.6). Устройство имеет основной цилиндрический поплавок (3), способный выдержать груз, превышающий не менее чем удвоенный вес заполненного водой приемника и арматуры устройства. Кроме того, имеется дополнительный поплавок (4), свободно перемещающийся относительно основного поплавка.

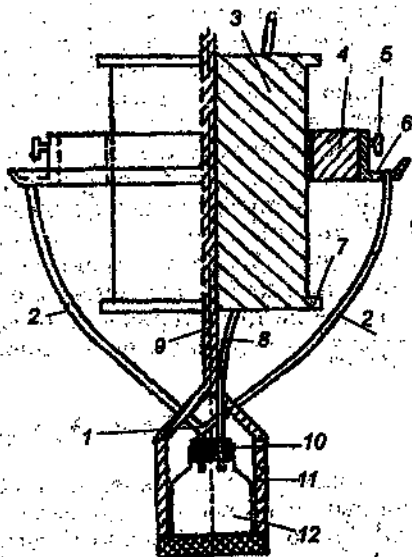


Рис. 11.6. Устройство для отбора проб воды из тонкого поверхностного слоя.

Усл. обозначения см. текст.

Заборное устройство (6) L-образной формы крепится с помощью фиксирующего устройства (5) к поплавку (4) так, чтобы оно могло занимать определенное, заранее заданное в зависимости от плотности воды положение относительно поверхности воды. В поддоне заборного устройства предусмотрены отверстия со штуцерами для стока отобранной пробы через гибкие планги (2) в приемник пробы воды (12). Приемник пробы снабжен стеклянным тройником (1), проходящим через пробку приемника (10), трубкой (8) для выхода воздуха из приемника по мере заполнения его отобранной пробой и устройством для крепления приемника (11) с уравновешивающим грузом. Металлический стержень (9), проходящий вдоль внутренней оси цилиндрического поплавка, служит для подвески всего устройства. Приспособления (7) ограничивают движение дополнительного поплавка (4) как при подъеме или опускании всего устройства, так и при заглублении цилиндрического поплавка по мере заполнения приемника пробой воды.

Перед началом работы все устройства для отбора проб на борту судна или на берегу опускаются в бак с водой той же плотности, что и вода исследуемой акватории, при этом определяется необходимое заглубление наружного края L-образного заборного устройства по отношению к поверхности воды (не более 1 см), которое закрепляется фиксирующим элементом. Затем со пилотки или непосредственно с борта судна устройство выносится на водную поверхность, где необходимо отобрать пробу воды из тонкого поверхностного слоя или пробу воды на поверхностное загрязнение. После заполнения приемника пробы все устройство поднимается на борт судна, а вода поступает на химический анализ.

Возможность вертикального перемещения дополнительного поплавка относительно основного цилиндрического поплавка, а также форма заборного устройства в виде L-образной планки и возможность его вертикального перемещения вдоль дополнительного поплавка с фиксацией определенного положения наружного края заборного устройства относительно водной поверхности позволяют отбирать пробы воды из тонкого поверхностного слоя заранее заданной толщины от 1 см и менее. Подобное распределение степеней свободы заборного устройства позволяет ему оставаться в неизменном положении относительно поверхности воды, несмотря на заглубление цилиндрического поплавка за счет увеличения силы тяжести по мере заполнения пробоприемника.

## 11.4. Хранение проб воды

Склянки для хранения проб воды должны быть изготовлены из не выщелачиваемого морской водой стекла, обладать необходимой емкостью (100—200 мл) и герметически закрываться. Совершенно не выщелачивающегося стекла не бывает, но склянки из темного стекла выщелачиваются значительно меньше, чем из простого бесцветного. Если склянки для хранения проб воды используются впер-

вые, то необходимо наполнить их морской водой до горлышка и как минимум неделю выдержать наполненными. Стекло несколько растворится, но затем эта его способность исчезнет и на точность анализов влиять не будет. После этого склянки промывают пресной водой. Если же они уже использовались для хранения проб, можно лишь промыть их сначала горячей мыльной водой, а затем холодной пресной. Вымытые склянки просушивают, держа их в стойках вверх дном, затем затыкают пробками и укладывают в ящики. Непосредственно перед отбором проб для удаления остатков пресной воды или воды предыдущей пробы склянки необходимо два-три раза промыть исследуемой водой.

При длительном хранении проб или их транспортировке пробки склянок следует заливать менделеевской замазкой или восковой массой (две части воска, две части парафина и одна часть канифоли). Также возможна закупорка склянок резиновыми пробками с обязательным надеванием сверху резиновых колпачков. Обычно склянки хранят в специальных ящиках с подбитыми войлоком дном и крышкой. Ящики должны иметь запор и две ручки для переноски. В каждом ящике не рекомендуется размещать более 50 склянок на 200 мл, так как ящики большого размера неудобны в работе и при транспортировке.

## Глава 12

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛЕННОСТИ И ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

#### 12.1. Соленость морской воды и способы ее определения

##### Поле солености

Соленость морской воды обобщенно определяет морскую воду как химическую среду, является в океанографии основой для характеристики водных масс, вычисления элементов морских течений, важным фактором при распределении живых организмов. Основное определение солености, принятое еще в 90-х годах XIX в., сформулировано следующим образом (Океанология. Термины и определения. ГОСТ 18456-76. Москва. 1973): «соленость морской воды есть суммарное содержание в граммах всех твердых минеральных растворенных веществ, содержащихся в 1 кг морской воды, при условии, что бром и йод замещены эквивалентным количеством хлора, все углекислые соли переведены в окиси, а все органические вещества сожжены при температуре 480 °С». Соленость выражается в промилле (‰), что соответствует количеству солей в граммах, растворенных в 1 кг воды. Данная соленость является абсолютной и обозначается символом *S*.

Соленость в океане меняется в широких пределах. Средняя соленость вод Мирового океана составляет 35 ‰, а диапазон ее возможных изменений 0—40 ‰. В районах стоков рек она заметно падает. Минимальные и максимальные значения солености наблюдаются во внутренних морях в зависимости от преобладающего влияния испарения или речного стока с осадками. В среднем соленость в океане меняется в пределах 28—38 ‰. При этом экстремальные значения солености наблюдаются в приповерхностном слое океана, а минимальные — встречаются в районах малого обмена с водами открытого океана, особенно в приустьевых участках рек (Финский залив Балтийского моря, Днепровско-Бугский лиман Черного моря и т. д.). Воды с максимальной соленостью наблюдаются в районах с интенсивным испарением и отсутствием речного стока. В Персидском заливе, например, соленость воды на поверхности достигает 37—39 ‰, а в восточной части Средиземного моря и в Красном море 40—41 ‰.

Среднегодовые колебания солености на поверхности в открытом океане незначительны и не превышают 0,2 ‰, на глубинах 2000—3000 м 0,02—0,04 ‰. Исключение составляют полярные районы, где амплитуда колебаний солености достигает 0,7 ‰, и некоторые прибрежные районы с интенсивным стоком пресных вод со среднегодовой амплитудой солености до 5 ‰. Крупномасштабное распре-

деление солёности в глубинах океана зависит от распределения испарения и осадков на его поверхности и общей схемы циркуляции вод океана. Воды пониженной и повышенной солёности обычно отделены ярко выраженным галоклином — слоем повышенного вертикального градиента солёности. Середина этого слоя расположена на глубине 300—700 м. В ряде районов существуют глубинные высокосолёные воды (Средиземное, Красное моря), которые через проливы проникают в океан, смешиваясь с океанскими водами, и распространяются на большие расстояния.

### Методы определения солёности

Прямые методы измерения солёности (по массе сухого остатка или по сумме масс отдельных ионов) практически неприменимы в океанологической практике. Информация о солёности морской воды при гидрофизических исследованиях, как правило, получается косвенным путем. Определение солёности можно производить, учитывая, что практически все свойства морской воды (при постоянных давлении и температуре) зависят от ее солевого состава. Поэтому на практике обычно пользуются определением какого-либо одного физико-химического параметра воды, связанного с ее солёностью известной теоретической или эмпирической зависимостью. Практические способы определения солёности приближенно могут быть разделены на химические, физические и биологические. В разное время были предложены многочисленные способы определения солёности: ареометрический — по плотности морской воды; аргентометрический — по концентрации хлора, находящегося в определенном соотношении с солёностью; криостатический — по зависимости точки замерзания воды от ее солёности; рефрактометрический — по показателю преломления света; магнито-индукционный — по магнитной восприимчивости; импедансный — по емкости двойного электрического слоя; по осмотическому давлению (этот метод мало изучен); электрический (электрометрический) — по электропроводимости и др. В любом случае при определении солёности *in situ* необходимо параллельное измерение температуры воды и гидростатического давления на тех же горизонтах. В табл. 12.1 приведены

Таблица 12.1

Допустимые погрешности измерения солёности различными методами

| Метод определения солёности     | Допустимая погрешность |             |                                    |                                 |                   |                       |
|---------------------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
|                                 | Т °С                   | Давление, % | Коэффициент преломления, $10^{-5}$ | Удельная электропроводимость, ‰ | Скорость звука, % | Осмотическое давление |
| По коэффициенту преломления     | 0,0560                 |             | 0,685                              |                                 |                   |                       |
| По удельной электропроводимости | 0,0170                 | 0,86        |                                    | $3 \cdot 10^{-2}$               |                   |                       |
| По скорости звука               | 0,0075                 | 0,04        |                                    |                                 | $2 \cdot 10^{-2}$ |                       |
| По осмотическому давлению       | 2,5000                 |             |                                    |                                 |                   | 0,12                  |

погрешности измерения исходных характеристик для большинства перечисленных способов, позволяющие определять соленость с погрешностью не более  $\pm 0,05$  ‰ в диапазоне солености 27—38 ‰, температур  $-2...35^{\circ}\text{C}$ , давления 0—600 атм.

Некоторые из способов определения солености потенциально имеют весьма высокую точность, например, импедансный способ теоретически позволяет построить приборы с точностью измерения  $\pm 0,00001$  ‰, но эффективность применения большинства из них низкая. С появлением новых технических возможностей в попытках построить высокоэффективные солемеры периодически возвращаются к уже отброшенным способам. Например, развитие оптических квантовых генераторов привело к разработке рефрактометрического метода с лазерным источником, точность которого в экспериментальных условиях  $\pm (10^{-3} - 10^{-4})$  ‰.

Анализ табл. 12.1 и практика проведения океанологических исследований позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время наибольшее распространение в исследованиях нашли аргентометрический метод и метод определения солености по удельной электропроводимости.

*Аргентометрический метод Мора*, относящийся к методам объемного количественного химического анализа, основан на вычислении солености по ее хлорности. Такая возможность обусловлена постоянством относительного состава растворенных в морской воде солей. Это положение, основанное на данных анализа проб морской воды, взятых в различных частях океанов, выдвинутое в 1865 г. Фиршхаммером, а затем подтвержденное Диттмаром после экспедиции на «Челленджер» (1872—1876 гг.), не претерпело сколько-нибудь существенных изменений и в настоящее время. Следовательно, если считать, что морская вода представляет собой водный раствор неорганических веществ, определение концентрации одного из основных ионов можно использовать как меру для вычисления содержания других ионов и общей солености морской воды. Так как ионы хлора составляют более 50 % растворимых твердых веществ, их определение титрованием с помощью азотнокислого серебра стало стандартным методом определения солености морской воды по решению Международного совета по изучению моря (Кнудсен, 1901 г.). Хлорность (в граммах на 1 кг морской воды) является суммой галогенов и численно тождественна числу граммов серебра, необходимого для осаждения галогенов в 0,3285234 кг морской воды.

Эмпирическая зависимость, связывающая соленость морской воды ( $S$ ) и хлорность ( $Cl$ ), была получена Кнудсеном, но используется и в настоящее время

$$S \text{ ‰} = 0,030 + 1,8050 Cl \text{ ‰}.$$

Аргентометрический способ заключается в титровании известного объема морской воды неизвестной солености раствором азотнокислого серебра известной концентрации. Соединения галогенов при этом, реагируя с  $\text{AgNO}_3$ , превращаются в галоидные соли серебра и выпадают в осадок:



По количеству израсходованного азотнокислого серебра судят о концентрации исследуемой пробы. Индикатором для титрования служит десятипроцентный раствор хромовокислого калия ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ). При осаждении всех галогенидов в виде солей серебра индикатор, реагируя с  $\text{AgNO}_3$ , образует хромовокислое серебро, изменяющее окраску пробы со светло-желтой на красновато-оранжевую:



Во время работы концентрация раствора  $\text{AgNO}_3$  неоднократно уточняется определением так называемого титра по нормальной воде, концентрация которого известна. *Нормальная вода* производится из очищенной океанской воды в специальных лабораториях и выпускается в стеклянных запаянных ампулах, на этикетке которых указывается концентрация хлорности. Ее концентрация, а следовательно, и электропроводимость выдерживаются с высокой степенью точности (0,003 %). Содержание хлорности в нормальной воде обычно подгоняют к значению 19,380 ‰.

Для титрования проб на судне используют следующее вспомогательное оборудование: бюретку, предназначенную для точного измерения объема азотнокислого серебра, израсходованного на титрование пробы; пипетку стандартного объема, предназначенную для отмеривания объема исследуемой пробы; сосуд с азотнокислым серебром, который должен быть из темного стекла и дополнительно закрыт малопрозрачным материалом с целью избежания разложения  $\text{AgNO}_3$  на свету; сосуд с дистиллированной водой; сосуд для слива оттитрованной пробы; титровальный стакан; сосуд с хромовокислым калием.

### Измерение электропроводимости морской воды

Абсолютная соленость, обозначаемая символом  $S_A$ , определяется как отношение массы растворенного в морской воде вещества к массе морской воды. На практике эта величина не может быть измерена непосредственно и вводится определение практической солености для представления океанографических наблюдений. Практическая соленость и является одним из гидрофизических параметров при расчете плотности морской воды на основании Международного уравнения состояния; она может быть рассчитана по значениям электропроводимости, температуры и гидростатического давления в соответствии с Международной шкалой практической солености (ШПС-78). Определение практической солености морской воды осуществляется на практике в основном двумя способами: непосредственным измерением относительной электропроводимости (ОЭП) морской воды, которая есть отношение удельной электропроводимости (УЭП) при температуре воды, равной  $t$ , к УЭП «нормальной» морской воды при той же температуре, и измерением УЭП, температуры



и гидростатического давления с последующим вычислением значений ОЭП. Для электропроводимости УЭП ( $\alpha$ ) является интегральной характеристикой содержания растворенных в воде солей и соответствует электрической проводимости  $1 \text{ см}^3$  раствора, находящегося между расположенными на расстоянии  $1 \text{ см}$  друг от друга электродами с площадью  $1 \text{ см}^2$ . УЭП вычисляется по формуле

$$\alpha = G_e K_e \text{ мСм/см},$$

где  $G_e$  — проводимость раствора в ячейке;  $K_e = l/S$  — геометрическая постоянная электролитической ячейки;  $l$  — среднее расстояние между электродами, см;  $S$  — средняя площадь сечения жидкостного столба раствора,  $\text{см}^2$ . Единица проводимости  $1 \text{ См}$  (сименс) =  $1 \text{ Ом}^{-1}$ .

Международная ШПС-78 была рекомендована МОК ЮНЕСКО в 1978 г. и принята к использованию с 1 января 1982 г. По сравнению с другими в ней уточнен алгоритм пересчета ОЭП воды в соленость, расширен температурный диапазон применения алгоритма ( $-2 \dots 35^\circ \text{C}$ ), а также введено дополнительное уравнение, учитывающее влияние гидростатического давления в диапазоне  $0-100 \text{ МПа}$ . В качестве первичного эталона в ШПС-78 используется электропроводимость раствора  $\text{KCl}$  с концентрацией  $32,4856 \text{ г}$  на  $1 \text{ кг}$  раствора дистиллированной воды при температуре  $15^\circ \text{C}$  и нормальном атмосферном давлении. ОЭП эталонного раствора при указанных внешних условиях принимается равной точно единице. Вторичным стандартом является «нормальная» морская вода с соленостью  $35,000$  единиц практической шкалы при тех же внешних условиях.

Практическая соленость пробы воды определяется как функция ОЭП при температуре  $15^\circ \text{C}$  и давлении в  $1$  стандартную атмосферу ( $1 \text{ ат. атм.} = 101\,325 \text{ Па}$ ) —  $K_{15}$  по отношению к эталонному раствору  $\text{KCl}$ . Значение  $K_{15}$ , в точности равное единице, соответствует значению солености  $35 \text{ ‰}$ . Соленость связана с  $K_{15}$  уравнением

$$S = 0,080 - 0,1692K_{15}^{1/2} + 25,3851K_{15} + 14,0941K_{15}^{3/2} - 7,0261K_{15}^2 + 2,7081K_{15}^{5/2}, \quad (12.1)$$

где  $2 \leq S \leq 42 \text{ ‰}$ ;  $K_{15} = \alpha(S, 15, 0)/\alpha(\text{KCl}, 15, 0)$ ;  $\alpha(S, 15, 0)$  — УЭП при температуре  $15^\circ \text{C}$  и атмосферном давлении пробы, приготовленной путем разбавления «нормальной» морской воды по массе дистиллированной водой или выпариванием;  $\alpha(\text{KCl}, 15, 0)$  — УЭП стандартного раствора  $\text{KCl}$  при температуре  $15^\circ \text{C}$  и атмосферном давлении.

В соответствии с ШПС-78 значения ОЭП определяются следующими соотношениями:

$$R_T = \alpha(S, t, 0)/\alpha(35, t, 0); \quad r_t = \alpha(35, t, 0)/\alpha(35, 15, 0); \quad (12.2)$$

$$R = \alpha(S, t, P)/\alpha(35, 15, 0) = R_T r_t R_p,$$

где  $R_T$  — отношение УЭП морской воды соленостью  $S$  к УЭП «нормальной» морской воды при одних и тех же температуре и атмо-

сферном давлении ( $P = 0$ );  $g_t$  — коэффициент, учитывающий зависимость УЭП «нормальной» воды от температуры;  $R$  — ОЭП морской воды соленостью  $S$ , при температуре  $T$  и давлении  $P$  по отношению к стандартному раствору  $KCl$  или «нормальной» воде при  $15^\circ C$ ,  $\alpha(35, 15, 0) = \alpha(KCl, 15, 0)$ ;  $R_p$  — коэффициент зависимости ОЭП от давления (при  $P = 0$   $R_p = 1$ ).

Для расчета солености по данным измерений *in situ* необходимо учитывать влияние давления на электропроводимость. Выражение для  $R_p$ , перекрывающее диапазон возможных давлений, находится из соотношения

$$R_p = 1 + P(2,070 \cdot 10^{-3} - 6,370 \cdot 10^{-6}P + 3,989 \cdot 10^{-9}P^2); \quad (12.3)$$

$$:(1 + 3,426 \cdot 10^{-2}t + 4,464 \cdot 10^{-4}t^2 + 4,215 \cdot 10^{-1}R - 3,107 \cdot 10^{-3}tR).$$

Здесь  $t$  выражено в градусах Цельсия,  $P$  — в барах;

$$g_t = 0,6766097 + 0,0200564t + 1,104259 \cdot 10^{-4}t^2 - \\ - 6,9698 \cdot 10^{-7}t^3 + 1,0081 \cdot 10^{-9}t^4. \quad (12.4)$$

Влияние относительно небольших различий между  $R$  и  $R_{15}$  при данной солености можно учесть, вводя поправку  $\Delta S$  к значению  $S$ , вычисленному при подстановке  $R_T$  вместо  $K_{15}$  в уравнение (12.1)

$$S = 0,80 - 0,1692R_T + 25,3851R_T^2 + 14,0941R_T^{3/2} - \\ - 7,0261R_T^3 + 2,7081R_T^{5/2}, \quad (12.5)$$

где

$$\Delta S = \{(t - 15)/[1 + 0,0162(t - 15)]\} \times \\ \times (0,005 - 0,0056R_T^{1/2} - 0,0066R_T - 0,0375R_T^{3/2} + 0,0636R_T^2 - 0,0144R_T^{5/2}).$$

Уравнения (12.3)—(12.5) действительны в диапазонах температур  $-2...35^\circ C$ , давления  $0—1000$  бар и практической солености  $2—42\%$ . Среднее квадратическое отклонение рассчитанных по этим соотношениям значений солености от экспериментальных данных равно  $0,0015$ . Для вычисления солености по данным лабораторных солеметров достаточно одного уравнения (12.5). Для расчетов, основанных на измерениях *in situ*, необходимо вычислить  $R_p$  и  $g_t$  по уравнениям (12.3) и (12.4) соответственно, а затем по уравнению

$$R_T = (R/R_p)g_t$$

вычислить  $R_T$ . Практическая соленость тогда может быть получена из уравнения (12.5). В табл. 12.2 приведены опорные значения величин, необходимых для контроля правильности вычислений по формулам (12.2)—(12.5) (по данным И. С. Ковчина).

Полный возможный диапазон изменения электропроводимости в различных районах Мирового океана, включая внутренние моря, составляет  $0,2—7,5$  См/м. Обычно пределы измерений УЭП устанавливаются  $1,5—6,0$  См/м. Абсолютная погрешность определения

Контроль расчета электропроводности

| $R$  | $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $P$ бар | $R_p$     | $r_1$      | $R_T$      | $S$       |
|------|-----------------------------|---------|-----------|------------|------------|-----------|
| 1,00 | 15                          | 0       | 1,0000000 | 1,00000000 | 1,00000000 | 85,000000 |
| 1,20 | 20                          | 200     | 1,0169429 | 1,11649270 | 1,06688750 | 87,245628 |
| 0,65 | 5                           | 150     | 1,0204864 | 0,77956585 | 0,81705885 | 27,995347 |

электропроводности не должна превышать порядка  $1 \cdot 10^{-3}$  См/м или относительная погрешность должна быть  $\pm(0,02-0,06)\%$ , что связано с использованием значений электропроводности для расчетов вторичных параметров — солености, плотности, скорости распространения звука, оптического показателя преломления и других критерияльных зависимостей. С точки зрения метрологического обеспечения получение таких погрешностей измерений представляет большую трудность. Обычно измеряют УЭП, поскольку она является интегральной характеристикой всех растворенных солей и, следовательно, весьма информативной характеристикой. Методы измерения УЭП основываются на зависимости УЭП растворов электролитов от концентрации электролита.

Основными элементами измерителей электропроводности жидкости являются датчики, которые можно разделить на контактные (микро- и макроконтатные), емкостные, индуктивные, трансформаторные с жидкостным витком связи, капиллярно-трансформаторные, капиллярно-контактные.

**Контактные измерители УЭП** морской воды имеют датчик в виде электродной кондуктометрической ячейки, электроды которой непосредственно контактируют с исследуемой средой. Контактный способ измерения УЭП основан на измерении активного сопротивления среды между электродами кондуктометрической ячейки. Конструкции этих датчиков разнообразны по формам, размерам и числу электродов. Для получения выходных сигналов, пропорциональных сопротивлению жидкости в измеряемой области, датчики включают в цепь уравновешенных и неуравновешенных мостов переменного тока.

Простейшим вариантом датчика является электролитическая ячейка (1) фиксированного объема (рис. 12.1), внутри которой расположены два электрода (2) и (3) на фиксированном расстоянии друг от друга.

Подобные макроконтатные датчики обычно используются для измерения средних значений и низкочастотных пульсаций УЭП. На их основе сконструировано большинство датчиков УЭП (погрешность измерения  $0,5-1,0\%$ ). Удовлетворительная точность измерений достигается вследствие большой активной поверхности электродов ( $1\text{ см}^2$  и более). Например, оригинальная трехэлектродная ячейка была разработана в ААНИИ.



Рис. 12.1. Кондуктометрическая ячейка датчика электропроводности.

Усл. обозначения см. текст.

Ячейка представляет собой цилиндрический корпус из изоляционного материала, установленного через уплотнитель на заземленный корпус всей измерительной системы (АЦИТ). По оси корпуса ячейки сделан сквозной канал, проходящий от торца корпуса до двух радиальных выводов у основания корпуса. Сквозной канал калиброван по размерам кварцевой трубки. В качестве одного из электродов ячейки используется корпус прибора со значительно большей, чем у потенциального и токового электродов (диаметр 3 мм), площадью контактирующей поверхности. В зоне потенциального электрода образуется область с близким к нулю градиентом напряжения.

Такая конструкция ячейки позволяет повысить точность измерений УЭП морской воды за счет уменьшения погрешностей, связанных с загрязнением электродов ячейки. Суммарная относительная погрешность в течение года эксплуатации равна 0,02 %, включая зависимость от питающего напряжения, температуры среды и искусственного загрязнения электродов.

При всех положительных сторонах кондуктометрических датчиков их возможности ограничены из-за сложности строгого учета эффекта поляризации электродов, заключающегося в образовании двойного электрического слоя на границе раствор—электрод, эквивалентного по действию конденсатору емкостью примерно  $16\text{--}20\text{ мкФ/см}^2$  (что для частоты 2 кГц представляет реактивное сопротивление  $4\text{--}5\text{ Ом}$ ), имеющему утечку и включенному последовательно с сопротивлением раствора. С увеличением частоты питающего напряжения поляризационный эффект практически не меняется, но собственные паразитные емкости электродной ячейки сказываются в меньшей степени. Поэтому чем выше электропроводимость, тем выше требуемая частота тока питания, а для морской воды оптимальной частотой питания ячейки является  $1\text{--}2\text{ кГц}$ .

Для снижения поляризационного эффекта иногда увеличивают активную поверхность электродов, покрывая их платиновой чернью (т. е. создают мелкопористую поверхность); используют неполяризующие электроды, позволяющие существенно уменьшить электродную разность потенциалов.

Одним из основных средств измерения мелкомасштабной УЭП являются *микроконтактные датчики*. Это обусловлено их высокой пространственной разрешающей способностью (до  $1\text{--}5\text{ мм}$ ), определяемой в основном линейными размерами чувствительного элемента — сферической области возле электрода. Известны конструкции микроконтактных преобразователей с одним и двумя микроэлектродами, которые могут использоваться для измерения как средних, так и пульсационных значений УЭП. Большинство таких конструкций содержит микроэлектрод из платины, в качестве второго электрода обычно используют корпус датчика, изготовленный, как правило, из нержавеющей стали. К недостаткам следует отнести сравнительно невысокую точность измерений и нестабильность выходного сигнала датчика от средней скорости потока, что объясняется соизмеримыми масштабами измерительной области с шириной диффузионной части двойного слоя.

Несравненно лучшими метрологическими характеристиками обладают четырехэлектродные датчики, получившие широкое распространение в океанологической практике в последнее время. Такой датчик содержит два внешних (токоподводящих) электрода и два внутренних (токосъемных). На внешние электроды подается переменное напряжение через сопротивление, обеспечивающее режим источника тока по отношению к сопротивлению участка ячейки между электродами. Выполнение этого условия обеспечивает постоянную силу тока через ячейку, практически не зависящую от изменения УЭП среды и изменчивости эквивалентных сопротивлений двойных электрических слоев на электродах.

В СТД-системе «Марк-ПВ» фирмы Нейл Браун электроды нанесены в виде тонких полосок на плоскую керамическую основу с малым температурным коэффициентом расширения, что позволяет избавиться от влияния изменчивости геометрии датчика, а отдельные электроды — от влияния двойных слоев. Основная погрешность измерения УЭП таких датчиков не превышает 0,01 %. Подобные пленочные датчики использованы также, например, в СТД-системах «Метеор» и «Дельфин», разработанных Донецким политехническим институтом.

Принцип емкостного метода основан на измерении активной электропроводимости эффективного объема воды в межэлектродном пространстве при высоких частотах питающего напряжения ( $f > 1 \text{ МГц}$ ). Точность измерения здесь тем выше, чем меньше емкостное сопротивление диэлектрической пленки, нанесенной на измерительные электроды. С этой целью используются очень тонкие пленки с высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon > 1000$ ). В емкостных датчиках комплексная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_a$ ), связанная с УЭП функциональной зависимостью вида

$$\epsilon_a = \bar{\epsilon}_a - i \epsilon''/\omega,$$

где  $\omega$  — круговая частота питающего напряжения, преобразуется в электрический параметр, который и фиксируется. Однако из-за нелинейности и нестабильности градуировочных характеристик, сложности нормирования по кондуктивной постоянной, невысоких точности, чувствительности и разрешающей способности подобного типа датчики не нашли применения в океанологической практике.

Наибольшее распространение среди бесконтактных датчиков УЭП получили индуктивные. Индуктивные датчики позволяют избавиться от недостатков двух предыдущих типов датчиков за счет отсутствия поляризации (нет непосредственного контакта со средой), большой стабильности и практически безынерционности, что дает возможность повышать чувствительность измерительных систем, увеличить точность измерений и надежность.

Принцип работы индуктивного датчика, состоящего из двух связанных через виток морской воды трансформаторов (трансформаторные преобразователи), заключается в том, что ЭДС в обмотке трансформатора возбуждается через виток проводящей среды, который

охватывает две тороидальные катушки и в приемном токовом трансформаторе наводит ЭДС, пропорциональную УЭП окружающей чувствительный элемент проводника (виток морской воды). Конструктивно датчики подобного типа выполнены следующим образом: два тороидальных трансформатора с обмотками (трансформаторы напряжения и тока) устанавливаются аксиально или коаксиально друг к другу в герметичном диэлектрическом корпусе обтекаемой формы с центральным калиброванным проточным отверстием.

На обмотку первого тороида  $Tr_1$  датчика (рис. 12.2) подается питание от источника переменного тока, к обмотке второго  $Tr_2$  подключен регистратор, входной сигнал которого зависит от сопротивления витка воды.

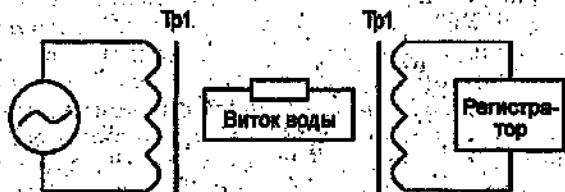


Рис. 12.2. Схема индуктивного датчика.

Частота переменного тока, подающегося на вход датчика, выбирается в пределах 5—10 кГц, так как в диапазоне 50 Гц — 20 кГц УЭП морской воды не зависит от частоты.

Индуктивные датчики обладают довольно высокой точностью (около 0,1 %) при измерениях УЭП *in situ* и используются во многих автоматических измерительных системах. Подобные датчики имеют более стабильные характеристики, но большие габариты (наружный диаметр 20—50 мм, внутренний 10—30 мм и длина 50—150 мм), а следовательно, и большой масштаб осреднения (около 300 мм), что исключает возможность измерения мелкомасштабных пульсаций УЭП.

К недостаткам подобных измерителей относятся зависимость показаний от амплитуды и частоты напряжения питания, нестабильность параметров сердечников тороидов, колебаний температуры. Кроме того, характер распределения электромагнитного поля показывает, что в пространстве вокруг датчика действует эффект экранирования поля проводящей средой. Этот эффект аналогичен скин-эффекту на поверхности проводников и отличается только тем, что источник электромагнитного поля находится внутри проводящей среды. Толщина экранирующего скин-эффекта зависит от проводимости среды и частоты тока. Из-за самоэкранирования плотность тока в витке воды убывает с расстоянием несколько быстрее, чем это следует из расчета в квазистатическом приближении, что может довести систематическую погрешность измерений УЭП при 6 См/м до 0,4 %.

Индуктивный датчик, разработанный в СКБ МГИ АН Украины, наиболее часто используется в отечественных автоматических системах. Его питание осуществляется источником переменного тока низкой частоты (1—5 кГц). В зависимости от схем вторичного преобразования измерения средних значений УЭП этим датчиком производятся с погрешностью 0,1—1,0 %.

Одной из проблем современной океанологии является исследование тонкой структуры вод океана, а также маломасштабной турбулентности. В первом случае (по В. С. Ястребову) необходимо измерять УЭП с погрешностью  $5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$  См/м, что соответствует толщине слоев от нескольких сантиметров до нескольких метров, а во втором случае — с погрешностью  $10^{-5} - 10^{-4}$  См/м, что соответствует пространственным масштабам от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Измерители пульсаций электропроводности характеризуются рабочей полосой частот в пределах 1—1000 Гц. Для измерения пульсаций УЭП в настоящее время используются гидрорезисторные, капиллярно-контактные и капиллярно-трансформаторные датчики.

**Принцип действия капиллярно-контактных датчиков (ККД)** заключается в замыкании линии тока между электродами через капилляр и в локализации чувствительной зоны датчика в малом объеме исследуемой среды. Локализация чувствительной зоны достигается тем, что подавляющая часть измеряемого сопротивления сосредоточивается вблизи входного отверстия в цилиндрический канал малого диаметра. Чувствительная зона при этом ограничивается областью со значительными градиентами плотности тока и включает диэлектрическую часть капилляра и прилегающую к нему краевую зону. Одновременно с возможностью измерения УЭП в неискраженной части потока в датчике обеспечивается стабилизация поверхностных условий на электродах. Уменьшение плотности тока в ККД достигается путем сосредоточения измеряемого сопротивления вблизи входа в капилляр, вынесения электродов из зоны максимальной плотности тока, а также путем использования электродов с большими активными поверхностями.

На этой основе во ВНИИМ было разработано несколько типов датчиков (двух-, четырех- и шестиелектродных), часть которых позволяет измерять средние и пульсационные значения УЭП. Основная погрешность измерения этими датчиками средних значений УЭП составляет  $\pm(0,5-1,0)\%$ , а пульсационных характеристик  $\pm 5\%$ .

**Капиллярно-трансформаторные датчики (КТД)** основаны на локализации области пространственного осреднения. Они обеспечивают одновременное измерение с достаточной точностью осредненных и пульсационных значений УЭП и значительно повышают разрешающую способность датчика, объединяя основные достоинства индуктивных и микроконтактных датчиков.

Локализация в подобных системах обеспечивается за счет капилляра (5) в стеклянной носовой части (4) обтекаемого диэлектрического корпуса (3) (рис. 12.3). Внутри корпуса расположены тороидальные магнитопроводы (1) и (2) с возбуждающей и измерительной обмотками. Благодаря свободному потоку воды через канал (5) и внутреннюю полость (6) образуется замкнутый

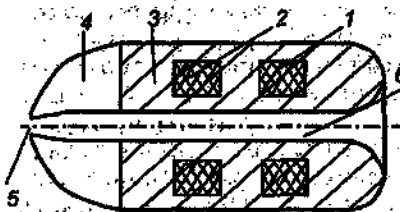


Рис. 12.3. Капиллярно-трансформаторный датчик.

Усл. обозначения см. текст.

виток жидкости вокруг магнитопроводов. Малое сечение канала сосредоточивает преобладающую часть сопротивления витка воды внутри отверстия капилляра и в зоне перед ним, т. е. чувствительной областью является внешняя краевая область вблизи отверстия насадки, сопротивление которой определяется кондуктометрическим датчиком. Радиус отверстий насадки выбирают примерно 1—4 мм.

Из-за возрастания сопротивления витка воды в этих конструкциях уменьшается коэффициент передачи датчика (кондуктивная постоянная) до  $500-800 \text{ Ом}^{-1}$  при диаметре отверстия насадки 3—4 мм, что является недостатком. При измерениях *in situ* канал загрязняется, что изменяет диаметр отверстия. Наряду с влиянием температуры это обстоятельство приводит к погрешности измерений порядка  $\pm 0,5 \%$ , что вполне достаточно для измерения пульсаций, но не всегда приемлемо для измерения средних значений. Индуктивные датчики без насадок обладают погрешностями на порядок меньше указанных, что вполне достаточно для измерения средних значений УЭП.

Последние разработки НПО ВНИИМ в области ККД и КТД в сочетании с новыми методами их согласования измерительными цепями позволили решить задачу одновременного измерения в локальном объеме потока ( $5-30 \text{ мм}^3$ ), высокой чувствительности ( $10^{-5} \text{ См/м}$ ) и точности примерно 0,2—0,5 % по средним и 5—10 % по пульсационным значениям УЭП.

Создана модель датчика, сочетающего достоинства ККД и КТД. Основная ее особенность — наличие концентратора в виде электропроводящего слоя, нанесенного на наружную и внутреннюю части корпуса датчика с разрывом относительно входа в капилляр. Он шунтирует часть нерабочих участков жидкостного витка, уменьшая кондуктивную постоянную и увеличивая чувствительность датчика.

Разработан новый тип КТД с гидродинамическими сглаживаниями. Одна чувствительная зона, как у обычного КТД, реагирует на мгновенные значения электропроводимости набегающего потока. Вторая, расположенная внутри датчика в области ламинарного течения потока, реагирует на осредненное во времени значение УЭП или ее постоянную составляющую. Таким образом, капилляр одновременно является как пространственным фильтром для выделения переменной составляющей электропроводимости в потоке (зоне перед капилляром), так и временным фильтром для выделения постоянной составляющей. Конструктивно это осуществляется путем разрыва концентратора внутри приточной зоны датчика.

Технические характеристики для всех видов КТД

|                                                                        |                   |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Диапазон измерений, См/м .....                                         | 1—6               |
| Масштаб осреднения, мм .....                                           | 1—10              |
| Диапазон измерения среднеквадратических значений пульсаций, См/м ..... | $10^{-4}-10^{-1}$ |
| Погрешность измерения, %                                               |                   |
| средних значений .....                                                 | $\pm(0,5-1)$      |
| среднеквадратических значений пульсаций .....                          | $\pm(5-10)$       |



## 12.2. Плотность морской воды и способы ее определения

### Поле плотности

Плотность воды является одной из основных гидрофизических характеристик, и ее определение входит в программу практически всех океанографических экспедиций. Знание плотности морской воды необходимо для решения различных гидродинамических задач. В народном хозяйстве плотность воды учитывается в целом ряде случаев. Например, для оптимальной загрузки нефтеналивных танкеров, при проектировании различных погружаемых объектов и т. д.

Изменение плотности воды обуславливает возникновение в морях ряда гидрофизических процессов и явлений динамического и термического характера: градиентных и циркуляционных течений; определенного типа температурной стратификации, способствующей перемешиванию поверхностных и придонных вод, обогащению кислородом и питательными веществами, необходимыми для развития жизни.

Плотностью воды, как и плотностью любого тела, называют отношение массы тела к его объему. За единицу плотности принята плотность дистиллированной воды при температуре  $3,98^{\circ}\text{C}$  в  $\text{г/см}^3$ .

Плотность воды достаточно сильно зависит от температуры, солености, химического состава растворенных веществ, давления и наличия в воде взвешенных частиц. По молекулярно-кинетической теории строения вещества с повышением температуры плотность жидкостей, как правило, уменьшается. Однако вода в интервале температур от  $0$  до  $4^{\circ}\text{C}$  ведет себя аномально. В этом интервале с повышением температуры плотность воды увеличивается, а при температуре выше  $4^{\circ}\text{C}$  — уменьшается.

Температурная аномалия плотности воды объясняется особенностью строения ее молекулы. При нагревании воды одновременно идут два противоположно направленных процесса: нормальное увеличение объема вследствие усиления теплового движения молекул и уменьшение объема при изменении кристаллической решетки за счет перемещения молекул в пустоты упаковки. При температуре выше  $4^{\circ}\text{C}$  интенсивнее идет процесс увеличения объема и, следовательно, уменьшения плотности воды за счет увеличения расстояния между ее молекулами. В интервале температур от  $0$  до  $4^{\circ}\text{C}$  — процесс уменьшения объема и увеличения плотности воды за счет уменьшения пустот в «ажурной» структуре. В момент выравнивания интенсивности обоих процессов, наступающий при  $3,98^{\circ}\text{C}$ , наблюдается наибольшая плотность. При температуре, близкой к  $4^{\circ}\text{C}$ , изменение плотности воды, вызванное изменением температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ , составляет  $8 \cdot 10^{-6}$ , а при температуре  $30^{\circ}\text{C}$  —  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Аномальным свойством является также своеобразное поведение плотности при фазовом изменении состояния воды. В момент образования льда плотность воды скачкообразно уменьшается примерно на  $10\%$ . Плотность дистиллированной воды при  $0^{\circ}\text{C}$  равна плот-

ности льда, образованного из той же воды при  $0^{\circ}\text{C}$ , и составляет  $0,09167\text{ г/см}^3$ . Благодаря этому свойству появление льда сопровождается не уменьшением объема, а его увеличением, таяние льда — не расширением, а сжатием. При охлаждении воды кристаллическая решетка непрерывно деформируется, переходя от кварцевой (более плотной) к тридимитовой (более рыхлой). К моменту замерзания завершается полная перестройка молекул, что и приводит к увеличению объема.

Плотность морской воды больше плотности дистиллированной воды при той же температуре, поскольку в ней содержатся соли с большим удельным весом, чем вода. Плотность воды повышается с увеличением солености. Растворенные в воде газы влияют на плотность незначительно. При температуре, например,  $5-8^{\circ}\text{C}$  плотность воды, насыщенной воздухом, на  $0,000003\text{ кг/м}^3$  меньше плотности воды, не содержащей воздуха.

Влияние гидростатического давления на плотность сказывается на очень больших глубинах, где под громадной тяжестью вышележащих слоев вода несколько сжимается и плотность ее увеличивается.

По результатам измерений значения плотности воды на поверхности Мирового океана лежат в пределах  $0,09960-0,10283\text{ г/см}^3$ . Наибольшая плотность отмечается в придонных областях глубоководных впадин, максимальное значение ( $0,10757\text{ г/см}^3$ ) было зафиксировано во впадине Челленджера.

### Определение удельного веса морской воды

Наряду с плотностью в океанологической практике широко используются такие характеристики, как *удельный вес* морской воды — безразмерное отношение веса (массы) этой воды при температуре  $17,5^{\circ}\text{C}$  к весу (массе) дистиллированной воды того же объема и при той же температуре — и *удельный объем* — величина, обратная плотности, т. е. объем единицы массы.

Еще в XVII в. итальянский ученый Фердинанд Марсильи, по свидетельству С. О. Макарова, проводил измерения удельного веса морской воды в Босфоре и Лионском заливе Средиземного моря с помощью специального прибора — ареометра. Э. Х. Ленц во время кругосветного плавания шлюпа «Предприятие» под командованием О. Е. Коцебу в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах выполнил большое число определений плотности воды на горизонтах, пробы воды на которых отбирались батометрами.

Плотность воды может быть определена непосредственным взвешиванием известного объема воды с одновременным измерением температуры. Взвешивание может производиться двумя способами: 1) непосредственное взвешивание — наиболее точный, но неприемлемый в судовых экспедиционных условиях из-за невозможности использования высокоточных весов, при этом пользуются специальными приборами-пикнометрами; 2) взвешивание в воде (гидростатическое взвешивание), выполняемое с помощью так называемых ареометров постоянного веса, с одновременным измерением темпе-

ратуры пробы. В настоящее время используется на береговых гидрометеорологических станциях и в некоторых экспедициях.

Ареометр представляет собой стеклянный поплавок с тонкой цилиндрической шейкой, в которую вставлена шкала с делениями. При измерениях в сосуде с пробой поплавок устанавливается вертикально, для чего в его нижней части находится груз (контейнер, заполненный дробью или ртутью). В зависимости от плотности пробы воды ареометр погружается на различную глубину, что отмечается по шкале, помещенной в шейке прибора. Шкала отградуирована в значениях условного удельного веса.

Но чаще всего в океанографической практике определение плотности выполняют по известным значениям температуры и солености.

### Определение плотности морской воды

В 1980 г. МОК при ЮНЕСКО было принято Международное уравнение состояния морской воды (МУС-80). Оно определено на основе ШПС-78, является более точным и охватывает больший диапазон значений температуры и давления. Уравнением состояния морской воды называется зависимость, связывающая между собой параметры состояния: соленость, температуру, давление и плотность.

Относительная плотность морской воды определяется как отношение массы единицы объема воды при той же температуре, которую она имела в момент наблюдений, к массе единицы объема дистиллированной воды при 4 °C. Учитывая, что определение плотности и удельного веса морской воды производится с точностью до  $10^{-5}$ , для удобства пользования океанографическими материалами были приняты условные обозначения указанных величин. В океанологии принято плотность морской воды обозначать в условных единицах — условная плотность ( $\sigma_T$ ):

$$\sigma_T = (\rho - 1) \cdot 10^{-3}.$$

Условная плотность морской воды составляет от 18 до 82 единиц. Для определенных морей ее значение ниже. Плотность возрастает с увеличением солености и гидростатического давления и с уменьшением температуры. Плотность  $\rho$  ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) морской воды в функции практической солености, температуры и приложенного давления (МПа) определяется выражением

$$\rho(S, T, P) = \rho(S, T, 0) / [1 - P/K(S, T, P)], \quad (12.6)$$

где  $K(S, T, P)$  — средний модуль упругости;  $P = 0$  соответствует одной стандартной атмосфере (101 325 Па). Плотность морской воды при атмосферном давлении ( $P = 0$ ) может быть определена как

$$\begin{aligned} \rho(S, T, 0) = \rho_0 + (B_0 + B_1 T + B_2 T^2 + B_3 T^3 + B_4 T^4) S + \\ + (C_0 + C_1 T + C_2 T^2) S^{1.5} + d_0 S, \end{aligned} \quad (12.7)$$

где  $\rho_0$  — плотность стандартной среднеокеанской чистой воды, ко-

торая определяется соотношением, рекомендованным Международным союзом чистой прикладной химии:

$$\rho_w = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (12.8)$$

Средний модуль упругости морской воды определяется как

$$K(S, T, P) = K(S, T, 0) + AP + BP^2, \quad (12.9)$$

где

$$K(S, T, 0) = K_w + (f_1 T + f_0 + f_2 T^2 + f_3 T^3)S + (q_0 + q_1 T + q_2 T^2)S^{1.5}; \quad (12.10)$$

$$A = A_w + (i_0 + i_1 T + i_2 T^2)S + j_0 S^{1.5}; \quad (12.11)$$

$$B = B_w + (m_0 + m_1 T + m_2 T^2)S; \quad (12.12)$$

$$K_w = l_0 + l_1 T + l_2 T^2 + l_3 T^3 + l_4 T^4; \quad (12.13)$$

$$A_w = h_0 + h_1 T + h_2 T^2 + h_3 T^3; \quad (12.14)$$

$$B_w = k_0 + k_1 T + k_2 T^2. \quad (12.15)$$

Численные значения коэффициентов уравнений (12.7)–(12.15) приведены в работе П. А. Колесникова «Первичная обработка гидрологической информации».

Расчет вторичных производных гидрологических параметров основан на зависимости от  $T$ ,  $S$  и глубины. Однако в настоящее время отсутствуют средства автоматического непосредственного измерения солёности и глубины *in situ*. Непосредственно измеряемыми являются  $T$  °C, УЭП, ОЭП, гидростатическое давление  $P$  и скорость распространения звука  $c$ . Для расчета вторичных параметров (солёность, плотность, глубина и т. д.) с наибольшей точностью в качестве трех первичных параметров целесообразно принять  $T$  °C,  $P$  и УЭП. При этом

$$\psi_i = f(T, \varepsilon, P).$$

При погрешностях лучших измерителей  $T$  °C, УЭП, ОЭП

$$\psi_T = 0,005 \text{ °C}, \psi_\varepsilon = 0,0005, \psi_P = 12 \cdot 10^{-5}, \psi_P' = 1 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

погрешность расчета солёности по выражению (12.5) составляет 0,0087 %.

## Глава 13

### ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

#### 13.1. Гравитационное поле

Основная цель проведения гравитационных измерений — это выявление аномальных масс в верхних оболочках Земли. Для решения геологических задач находят соответствующие аномальным массам избыточные плотности и затем геологические структуры (включая топографические особенности и региональный рельеф). В геодезии аномальные массы переводятся в превышения геоида и уклонения отвесной линии для более точного описания его формы, что повышает качество геодезических съемок и улучшает определение местоположения с помощью навигационных методов.

Для изучения аномальных масс требуется определение их гравитационного поля. Аномалия представляет собой разность значений силы тяжести на геоиде и на земном сфероиде. При этом значение на геоиде является наблюдаемым и редуцированным на уровень моря, а значение на сфероиде — это нормальное значение силы тяжести, вычисленное в предположении слоисто-однородной модели (отсутствия аномальных масс). Поэтому при вычислении аномалии наблюдаемое значение сначала редуцируется на уровень моря. В данные измерений, выполненных с движущегося основания, вводятся поправки, исключаяющие эффекты движения.

Редуцирование гравитационных данных проводится по стандартным методикам для получения одного из трех особым образом определенных типов аномалий силы тяжести. Это:

- аномалия в свободном воздухе, является простейшим типом аномалий. Наблюдаемое значение силы тяжести приведено к уровню моря посредством введения поправки на высоту станции без учета притяжения топографических масс и влияния рельефа, т. е. при редуцировании не делается никаких предположений о плотности пород, залегающих как выше, так и ниже уровня моря;

- аномалия Буге (полная), включает поправку на рельеф. Наблюдаемое значение силы тяжести приводится к уровню моря путем введения поправок на высоту станции и удаление масс, расположенных выше уровня, которые представляются в виде бесконечного горизонтального слоя с поверхностью, совпадающей с реальным рельефом;

- изостатические аномалии, для получения которых из наблюдаемого значения вычитают сумму топографических поправок, вычисленных для всех зон, и прибавляют сумму компенсационных поправок, также вычисленных для всех зон (зоны отличаются расстоянием от места производства наблюдений: от 2 до 166 700 м).

Поле силы тяжести и ее аномалии в различных районах Мирового океана имеют свои особенности. Области океанических котловин с глубинами 3000—6000 м характеризуются относительно спокойным полем с аномалиями, достигающими значения 450 мГал ( $1 \text{ мГал} = 10^{-5} \text{ м/с}^2$ ). Рифтовые подводные хребты и поднятия, относящиеся к современной тектонически-активной системе срединно-океанических хребтов, характеризуются относительными увеличениями аномалий Буге до 100 мГал.

Вулканические хребты и цепочки подводных вулканических гор выделяются интенсивными положительными аномалиями в свободном воздухе амплитудой до 100—200 мГал и несколько положительными по сравнению с окружающими котловинами аномалиями Буге амплитудой до  $\pm 260$  мГал.

Глыбовые поднятия и возвышенности отличаются слабыми положительными аномалиями в свободном воздухе и понижением аномалий Буге до 170 мГал. Переходные зоны от океанов и материков выделяются разными изменениями аномалий силы тяжести в редукциях в свободном воздухе, аномалиями Буге и изостатическими.

### 13.2. Методы измерения гравитационного поля Земли (ГПЗ)

Изучение ГПЗ проводится в интересах развития как фундаментальных представлений о строении Земли, так и народного хозяйства, в частности в интересах морской навигации. Приборы для измерения параметров ГПЗ необходимы для непосредственного описания аномалий ГПЗ и их количественных характеристик с точки зрения важнейшей прикладной задачи гравиметрии — определения фигуры и внутреннего строения Земли. Для этого необходимы подробные сведения о распределении силы тяжести в различных пунктах. Известно, что для представления фигуры Земли как математического объекта используют геоид — уровенную поверхность потенциала силы тяжести, совпадающую в океанах с невозмущенной уровенной поверхностью и продолжающуюся под материками при условии сохранения всех масс над ними. Практически невозможно непосредственно измерить потенциал силы тяжести, поэтому при определении параметров фигуры Земли используют измерения градиентных характеристик силы тяжести, а также углов и расстояний между пунктами физической поверхности Земли.

В 1967 г. на XIV Генеральной ассамблее Международного геодезического союза в Люцерне в качестве международной была рекомендована формула нормального значения силы тяжести, выведенная на основании данных гравиметрических и спутниковых наблюдений:

$$v = v_0(1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta' \sin^2 2\varphi),$$

где  $v$  — нормальная сила тяжести;  $v_0$  — экваториальная постоянная ( $9,780318 \text{ м/с}^2$ );

$$\beta = (5/2)q - \alpha - (17/14)qa = 0,0053024;$$

$$\beta' = (5/8)qa - (1/8)qa^2;$$

$\alpha = 0,0000059$  — сжатие сфероид;  $q = \Omega^2 a^2 / (fM)$ ;  $\Omega$  — угловая скорость суточного вращения Земли;  $a$  — радиус точки проведения измерений;  $f$  — гравитационная постоянная ( $6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$ );  $M$  — масса Земли;  $\varphi$  — широта.

Так же как и для силы тяжести, можно получить нормальные значения для вторых производных (производные силы тяжести по всем направлениям). Для модели Земли принятой формы выражения для вторых производных в горизонтальной системе координат (ось  $Ox$  направлена по меридиану) имеют следующий вид:

$$\Gamma_{xy}^0 = \Gamma_{yz}^0 = 0; \quad \Gamma_{xx}^0 = \Gamma_{yx}^0 (v_0/v_1) \beta \sin^2 2\varphi; \quad \Gamma_{xx}^0 = -(v/\rho_M);$$

$$\Gamma_{yy}^0 = -(v/\rho_M); \quad \Gamma_{zz}^0 = 2\Omega^2 + v(1/\rho_M + 1/\rho_N);$$

$$\rho = a(1 - e^2)/(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2};$$

$$\rho_N = a/(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}; \quad e^2 = (a^2 - b^2)/R^2,$$

где  $\rho_N$  и  $\rho_M$  — радиусы кривизны сечений сфероида плоскостями меридиана и первого вертикала;  $e$  — эксцентриситет сфероид.

В качестве практической единицы измерения вторых производных потенциала силы тяжести принята внесистемная единица градиента силы тяжести, равная изменению ускорения свободного падения на  $10^{-9} \text{ см/с}^2$  на 1 см длины, называемая этвеш (Е).

Особое положение среди методов изучения ГПЗ занимает морская гравиметрическая съемка в связи с обширностью акватории Мирового океана, его слабой изученностью и, конечно же, с учетом условий измерений (качка и помехи от движения судна) и особенностей структуры изучаемого поля. В последнее время широкое распространение нашла спутниковая радиосальтиметрия, позволяющая получать информацию о гравитационном поле обширных акваторий, правда, с разрешением только 40—100 км. Детальные исследования более тонкой структуры поля остаются прерогативой приземных методов. Для морских измерений основной аппаратурой в настоящее время являются относительные гравиметры и в меньшей степени морские маятниковые приборы.

Исходной основой для относительных измерений служат опорные гравиметрические пункты (ОГП) в портах, значение гравиметрического поля на которых определяется в принятой национальной Гравиметрической системе. Гравиметрическая система в свою очередь согласована с принятой моделью Нормальной Земли и Геодезической системой. Совокупность этих данных, устанавливаемых на длительный срок, позволяет определить среднее ускорение свободного падения на экваторе и полюсах Земли, коэффициенты широтных членов принятой нормальной формулы, а также значение ускорения свободного падения в одном из ОГП, принимаемом за начальный в национальной опорной гравиметрической сети. Непосредственные измерения значений ускорения свободного падения от начального

пункта сети передаются на другие ОГП. Совокупность всех значений ОГП сети уравнивается, и полученные значения используются для развития более подробных сетей низшего разряда точности. Все ОГП подразделяются на пункты разных категорий точности: фундаментальные, наивысшей точности и ОГП опорных сетей I, II и III классов. Для морской съемки имеют значение береговые ОГП, определяемые от сетей I и II классов со средней квадратической погрешностью не более 0,15 мГал и размещенные в капитальных сооружениях вблизи пунктов базирования судов, а также вспомогательные береговые ОГП у причалов, определяемые от береговых ОГП или пунктов сетей I—II классов со средней квадратической погрешностью также не превышающей 0,15 мГал.

В Балтийском, Баренцевом, Черном и Охотском морях создан ряд морских гравиметрических полигонов, предназначенных для контроля результатов морской съемки. Однако официальный статус (образцовая мера третьего порядка) имеет у нас в стране лишь Анапский полигон, снятый в 1983—1984 гг. в четырех независимых рейсах группой из двух донных гравиметров ГДК. Полигон состоит из ряда профилей длиной 50 км, привязанных к пунктам государственной гравиметрической сети II класса со средней квадратической погрешностью 0,18 мГал. В настоящее время ведутся работы по созданию метрологического полигона в районе Курильских островов.

В зависимости от цели и методики выполнения морские гравиметрические съемки подразделяются на три вида:

- общая (генеральная) — для решения планетарных геодезических задач;

- региональная — для определения достаточно подробных характеристик поля силы тяжести Земли в больших регионах;

- детальная — с целью геологической разведки и решения различных научно-прикладных задач в локальных районах.

С расширением использования неконтактных методов исследования ГПЗ роль первых двух видов съемки уменьшается, но проведение детальной гравиметрической съемки, особенно в ярко выраженных аномальных районах, по-прежнему весьма актуально. Исходя из необходимой точности, детальную съемку можно разделить на три класса: I класс — средняя квадратическая погрешность аномалий не более 1 мГал, II класс — не более 2 мГал и III класс — не более 3 мГал.

Опыт проведения морских гравиметрических съемок с использованием современных гравиметрических комплексов во всем мире показывает, что суммарная погрешность измерений в большей степени зависит от точности определения координат гравиметрической станции и особенно от поправки, возникающей за счет эффекта Этвеша. Определение среднего значения поправки Этвеша за 0,5—1,0 ч не вызывает сложности. Но вариации эффекта Этвеша вследствие ветрового дрейфа судна, переменных течений, асимметричного рыскания, нестабильности работы судовых машин и других причин могут происходить существенно быстрее и в зависимости от типа судна и



условий измерений достигать 10 мГал. Рекомендуется принимать корреляционную функцию поправки Этвеша для малых судов в виде

$$R_M(\tau) = e^{-\alpha(\tau)}, \quad \alpha = 1/400 \text{ с}^{-1},$$

а для средних судов в виде

$$R_M(\tau) = e^{-\alpha(\tau)} \cos \beta \tau,$$

где  $\alpha = 1/700 \text{ с}^{-1}$ ,  $\beta = 1/400 \text{ с}^{-1}$ .

Учитывая, что современные спутниковые навигационные системы позволяют непрерывно определять координаты местоположения судна даже в открытом море с погрешностью не более 50 м, во главу угла встает вопрос о повышении инструментальной точности гравиметров при наличии значительного фона ускоряющих возмущений. В основу разработки морских гравиметров были взяты конструкции наземной гравиметрической аппаратуры, точность которой не хуже 0,1 мГал. Увеличение погрешности измерений в морских условиях вызвано влиянием возмущающих ускорений, иногда превышающих потенциальные возможности приборов.

### 13.3. Аппаратура для проведения гравиметрических измерений

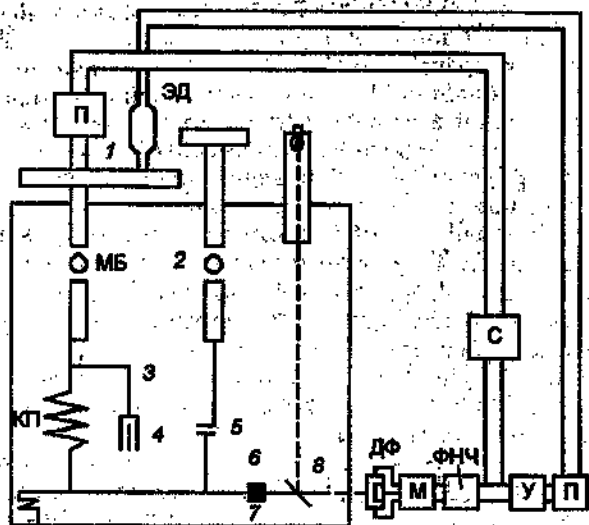
Имеющаяся гравиметрическая аппаратура предназначена для измерения либо приращений силы тяжести, либо ее абсолютных значений. Морские гравиметры могут измерять приращения силы тяжести с точностью до 0,1 мГал. Гравиметр представляет собой прибор, измеряющий чрезвычайно малые приращения веса. Вес пробной массы изменяется в соответствии с изменением гравитационного поля. Основу гравиметра составляет масса, закрепленная на спиральной пружине, закрученной нити или колеблющейся струне (полоске металла). Различают два основных типа пружинных гравиметров:

— неастазированные статические гравиметры, в которых высокая чувствительность, необходимая для измерения малых перемещений груза (или угла закручивания), достигается за счет высокой степени оптического или механического усиления. На массу в этом случае действуют две силы: сила тяжести и сила упругости пружины (или ей эквивалентная);

— нелинейные или астазированные статические гравиметры, в которых на массу действует уравновешивающая сила, приводящая к неустойчивости, вследствие которой малые изменения силы тяжести влекут за собой относительно большие движения массы. Шкала астазированных гравиметров не линейна, однако они обычно имеют более высокую чувствительность. Они линеаризуются с помощью линейного измерительно-компенсационного устройства.

Начало созданию морских гравиметров у нас в стране положил К. Е. Веселов, разработавший в 1953—1956 гг. способ измерения силы тяжести на подвижном основании посредством статического

Рис. 13.1. Структурная  
схема гравиметра ГМН.  
Уск. обозначения  
см. текст.



гравиметра с сильно демпфированной упругой системой. Дальнейшая модернизация прибора Веселова привела к созданию в 1972 г. гравиметра ГМН (гравиметр морской набортный), нашедшего широкое применение у нас в стране, особенно при съемках шельфовой зоны. Структурная схема гравиметра ГМН представлена на рис. 13.1.

Изменение силы тяжести приводит в гравиметре к отклонению рычага (7) астазированной упругой системы, измеряемому с помощью фотоэлектрического устройства, состоящего из источника света (лампочка накаливания), зеркала (8), закрепленного на рычаге, и дифференциального фотодиода (ДФ), включенного в мостовую схему (М). Выходной сигнал проходит через фильтр низких частот (ФНЧ) и после усилителя (У) поступает на вход релейного преобразователя (Р), который управляет реверсивным двигателем (ЭД). Последний через редуктор (1) поворачивает микрометрический винт (МБ), воздействующий через компенсационную пружину (КП) на рычаг, стремясь вернуть его в горизонтальное положение. На оси винта установлен потенциометр, сигнал которого является мерой измеренного ускорения силы тяжести и регистрируется самописцем. Упругая система помещена в кремнеорганическую жидкость. Демпфирование колебаний рычага осуществляется параллельными пластинами (3), связанными со штоком измерительного винта и пластиной (4) рычага. Демпфирование регулируется изменением зазора между пластиной рычагов и пластиной (5), укрепленной на штоке винта (2).

При работах на шельфе с международным интервалом менее суток и при возмущающих ускорениях до 30 Гал гравиметр ГМН-К обеспечивает точность измерений до 0,4 мГал. Но в условиях открытого океана при возмущающих ускорениях 100—150 Гал гравиметры этого типа не могут обеспечить достаточную точность (до 21 мГал), что вызвано несколькими причинами:

— низкой точностью гиromаятниковой вертикали и гиросtabilизированной платформы «Север», используемых для стабилизации гравиметров;

— большой погрешностью из-за эффекта взаимного влияния вертикальной и горизонтальной составляющих ускорения;

— необходимостью тщательной наладки в морских экспедиционных условиях из-за неучтенных и невыявленных дефектов при серийном заводском изготовлении.

В последнее время широкое распространение, особенно на судах ГУНЮ, для проведения морских гравиметрических съемок в океане нашли кварцевые гравиметры с двойной упругой системой крутильного типа МГК в сочетании с прецизионной гиросtabilизированной платформой «Чета», разработанные в ЦНИИ «Электроприбор». Комплексы подобного типа, получившие название МГК «Чета-АГ», позволяют проводить измерения при больших возмущающих ускорениях.

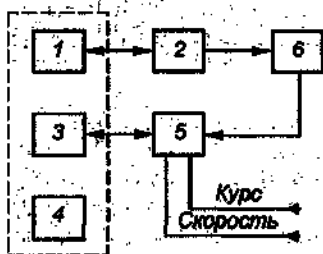


Рис. 13.2. Структурная схема МГК.

Усл. обозначения см. текст.

электроснабжения для гравиметра и гиросплатформы. В специализированном цифровом вычислителе (6) в реальном времени выполняются линеаризация шкалы гравиметра, цифровая фильтрация гравиметрической информации, вычисляются поправки Этвеша и вводятся поправки на скорость смещения нуля-пункта, т. е. проводится полная обработка результатов съемки, включая и оценку точности.

ЧЭГ состоит из трех основных систем: упругой системы подвеса пробного тела, оптико-электронного преобразователя и термостата. Упругая система гравиметра состоит из двух одинаковых кварцевых систем, расположенных на одном основании и развернутых друг относительно друга на  $180^\circ$ . Эти системы включают в себя рамку с нитью, к которой крепится маятник с пробным телом и зеркалом. Для обеспечения измерений нити предварительно закручивают так, чтобы маятник находился в положении, близком к горизонтальному. А изменение угла закручивания является мерой измерения ускорения свободного падения. Вся упругая система помещается в корпусе, заполненном полиметилсилоксановой жидкостью. Для контроля работы ЧЭГ в верхней части корпуса установлено защитное стекло с реперной бипризмой.

Структурная схема МГК (рис.13.2) в зависимости от комплектации включает в себя от одного до трех измерителей, из которых каждый состоит из чувствительного элемента гравиметра (ЧЭГ) (1), помещенного на гиросtabilизированной платформе (3). Влияние вибрации устраняется креплением гиросtabilизированной платформы на амортизирующем устройстве (4), представляющем собой трехступенчатый пространственный пневмоамортизатор. Приборы управления и электропитания (2, 5) содержат электронные модули сервоприводов и

Необходимая степень демпфирования обеспечивается изменением вязкости демпфирующей жидкости. Использование двойной системы при высокой степени идентичности и взаимной ориентировки отдельных систем позволяет практически исключить эффект взаимного влияния вертикальной и горизонтальной составляющих ускорения, возникающих в маятниковых системах из-за ускорений качки. Измерение угла поворота маятника производится оптико-электронным преобразователем автоколлимационного типа с использованием сканирующего устройства, состоящего из синхронного двигателя с укрепленным на его оси цилиндрическим барабаном. На боковой поверхности барабана расположена сетка с анализирующими щелями. При сканировании автоколлимационных изображений на выходе фотоприемника формируется последовательность импульсов, временные интервалы между которыми пропорциональны измеряемому ускорению свободного падения. В блоке управления временные интервалы преобразуются в код.

Для уменьшения дрейфа нуля-пункта, общего недостатка всех кварцевых систем, упругую систему термостатируют с помощью полупроводниковых микроохладителей при температуре, близкой к  $0^{\circ}\text{C}$ , с точностью поддержания температуры  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . При проведении испытаний МГК «Чета-АГТ» в 1983 г. была определена систематическая погрешность измерений по сравнению с данными гравиметрических пунктов, оказавшаяся близкой 1 мГал, среднее квадратическое отклонение 0,9 мГал.

Дальнейшее усовершенствование судовых гравиметров было направлено на достижение инструментальной погрешности измерений до  $\pm(0,2-0,8)$  мГал. Это было достигнуто в современных образцах отечественной гравиметрической аппаратуры за счет:

- разработки герметичной упругой системы, свободной от влияния давления и влажности окружающей среды и исключаяющей возможность появления самопроизвольных выбросов показаний;
- повышения точности термостатирования упругой системы при  $0^{\circ}\text{C}$  до  $\pm(0,01-0,03)^{\circ}\text{C}$ ;
- снижения инструментальной погрешности оптико-электронного преобразователя до 0,1 мГал.

Учет всех этих требований позволял создать морские гравиметрические комплексы, характеристики которых близки к параметрам зарубежных аналогов. Тенденция развития морской гравиметрической аппаратуры у нас и за рубежом практически совпадают.

# Глава 14

## НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЛЬДОМ

### 14.1. Цель ледовых наблюдений

Непрерывный обор сведений о состоянии льда в море выполняется для получения представления о ледовой обстановке и для исследования гидрологического и ледового режимов. Ледовая обстановка, т. е. состояние и характеристики ледяного покрова, практически полностью определяет условия мореплавания, рыболовства и добычи полезных ископаемых на акваториях с имеющимся ледяным покровом. Знание ледовой обстановки и ледового режима позволяет обеспечивать заинтересованные организации ледовыми информацией, прогнозами и пособиями. Особое значение ледовые наблюдения имеют в приполярных районах, где успех проведения морских операций во многом зависит от надежности и своевременности этой информации.

Долгое время источником сведений о ледовом режиме, особенно на арктических морях, были ледовые пункты и суда экспедиций различных стран, зверобойные шхуны и транспортные суда, совершавшие в короткий период навигации редкие плавания в прибрежной зоне этих районов. Из наиболее значительных морских арктических экспедиций можно отметить Великую северную экспедицию (1733—1743 гг.), Северо-восточную географическую и астрономическую экспедицию Иосифа Биллингса (1785—1795 гг.), исследования Восточного района Арктики П. Ф. Анжу и Ф. П. Врангелем (1820—1824 гг.), американскую экспедицию Д. В. Де-Лонга (1879—1881 гг.), экспедицию Ф. Нансена на судне «Фрам» (1893—1896 гг.), плавания л/п «Таймыр» и «Вайгач» (1910—1915 гг.).

В настоящее время наблюдения за морским льдом производятся с берега, со льда, с судна, самолета, вертолета и космических аппаратов. Все эти виды наблюдений за ледяным покровом в море выполняются по возможности синхронно по широкой программе и определенной методике. В результате этих наблюдений можно получить наиболее полную картину распределения ледяного покрова в соответствующем районе Мирового океана, т. е. разрешить многочисленные вопросы, связанные с изучением ледового режима исследуемого района.

### 14.2. Наблюдения за льдами с берега

Наблюдения производятся на специально оборудованных ледовых постах ежедневно с момента появления льда в районе наблюдений и заканчиваются после окончательного очищения всей акватории. Постоянный наблюдательный ледовый пункт оборудуется на

возвышенном месте с хорошим обзором прилегающей акватории, на расстоянии не более 200 м от береговой черты. Для этой цели используют специально построенную вышку, верхнюю площадку маяка и т. п. Здесь же по нормали к береговой черте выбирается постоянный отвор с условием, что ширина припая на нем будет характерной для всего района. Высоту ледового пункта (практически высоту оптической оси углодальномерного прибора) определяют с помощью нивелирования его высоты над средним уровнем моря. Характеристикой ледового пункта является также дальность видимого горизонта, под которой понимается то расстояние, на котором при самых благоприятных условиях погоды и освещения линия горизонта видна наблюдателю на ледовом пункте.

Для определения направления и расстояния до наблюдаемого объекта используются установленные на прочном основании волюмер-перспектометр ГМ-12 или теодолит. Кроме того, для определения направлений на различные объекты, находящиеся на водной поверхности, на ледовом пункте можно использовать ориентирный столб, верхний срез которого должен находиться на уровне глаз наблюдателя. На верхнем срезе под углом 45° друг от друга закрепляют ориентированные относительно истинного меридиана деревянные или металлические бруски. Конец бруска, обращенный на север, отмечается стрелкой.

Наблюдения на ледовом пункте подразделяются на основные и специальные. К основным наблюдениям, выполняемым всеми станциями, относятся определения: 1) дальности видимости поверхности моря; 2) положения кромки и ширины припая; 3) положения кромки плавучих льдов; 4) количества неподвижного льда; 5) количества чистой воды; 6) количества плавучего льда; 7) сплоченности (густоты) плавучего льда; 8) возрастных характеристик припая; 9) возрастных характеристик и форм плавучего льда; 10) торосистости припая и плавучего льда; 11) разрушенности припая и плавучего льда; 12) заснеженности припая; 13) загрязненности припая и плавучего льда; 14) сжатия плавучего льда; 15) скорости и направления дрейфа льда; 16) добавочных характеристик ледовой обстановки, а также 17) зарисовка ледовой обстановки и 18) измерения толщины льда, высоты и плотности снега на льду в постоянной точке.

При неустановившемся ледяном покрове наблюдения по пунктам 1—17 производятся ежедневно. При установившемся ледяном покрове наблюдения выполняются один раз в декаду: 10-го, 20-го числа и в последний день месяца. По пункту 18 измерения производятся ежедневно при толщине льда 5—20 см, через день при толщине льда 20—50 см, раз в пять дней при толщине льда 50—100 см и раз в декаду при толщине свыше 100 см. Плотность снега измеряется в осенне-зимний период раз в пять дней, а при толщине льда свыше 50 см — при измерении толщины льда. С началом весеннего таяния измерения производятся ежедневно.

1. Дальность видимости поверхности моря (расстояние в направлении, перпендикулярном общему распространению береговой чер-

ты) оценивают при плохой видимости в сотнях метров, а при хорошей — в километрах. Под дальностью видимости поверхности моря понимают то предельное расстояние, на котором наблюдателю при данных атмосферных условиях и освещении видна свободная ото льда или покрытая льдами поверхность моря. При отсутствии приборов (ГМ-12 или теодолит) определение видимости производят визуально.

2. Положение кромки и ширину припая обычно определяют по направлению, перпендикулярному береговой черте, с помощью ГМ-12 или теодолита, а в случае значительной ширины припая, когда с помощью приборов определить невозможно, расстояние определяют визуально. Если на станции выполняются профильные ледовые наблюдения, то при этом измеряют и ширину припая. Ширину припая определяют с точностью до 10 % ее максимального значения. На карту-бланк книжки ледовых наблюдений наносят положение и ширину припая. Кроме того, указывают имеющиеся в припая трещины, полыньи, каналы, их площадь, ширину, направление распространения.

3. Определение положения кромки плавучих льдов производят так же, как положения кромки и ширины припая. При нечетких очертаниях кромки льдов ее положение в море намечают на карте-бланке по возможности таким образом, чтобы за ее пределами была чистая вода или в крайнем случае вода с отдельными льдинами. Контуры больших пространств чистой воды (не менее 1 км) среди плавучих льдов также определяют и наносят на карту-бланк.

4. Определение количества неподвижного льда производят по 11-балльной шкале и оценивают как отношение площади, занятой неподвижным льдом, ко всей видимой в момент наблюдения площади моря, выраженное в процентах. Количество неподвижного льда, равное 0,5 балла или менее, приравнивается к 0, и в книжку наблюдений записывается 0, а превышающее 0,5 балла, т. е. если среди неподвижного льда наблюдаются небольшие пространства чистой воды, оценивается 10 баллами, и в книжку наблюдений записывается 10.

5. Определение количества чистой воды производят аналогично тому, как оценивают количество неподвижного льда, т. е. в баллах по 11-балльной шкале.

6. Определение количества плавучего льда производят визуально по 11-балльной шкале аналогично оценке количества неподвижного льда. При наличии неподвижного и дрейфующего льда его общее количество не должно превышать 10 баллов. Одновременно с определением количества плавающего льда отмечают и отдельно записывают на карте-бланке возрастные характеристики льда.

7. Определение сплоченности (густоты) плавучего льда выполняют визуально по 11-балльной шкале как отношение площади льдин плавучего льда к площади, на которой они распределены, выраженное в десятках процентов. Причем сплоченность первичных возрастных характеристик льда — ледяных игл, сала, снежуры, шуги — не определяют. При неодинаковой сплоченности льда в различных направлениях рекомендуется визуально разделить видимое пространство на две части: в одной густота льда наибольшая, а в другой —

наименьшая, при этом оценивается густота льда в каждой части. Обычно в книжку наблюдений записывают наибольший, наименьший и преобладающий баллы сплоченности на видимой акватории моря.

8. Определение возрастных характеристик припая производят на всей видимой с ледового пункта акватории моря в соответствии с «Номенклатурой морских льдов...», введенной у нас в стране с марта 1974 г. По возрастным характеристикам припай делится на следующие виды:

*темный нилас* — лед очень темного цвета толщиной 3—5 см;

*светлый нилас* — матовый непрозрачный лед толщиной 5—10 см, образовавшийся вследствие нарастания темного ниласа, а также благодаря смерзанию пуги или снежуры;

*серый лед* — молодой лед толщиной 10—15 см, образовавшийся при нарастании ниласа, склянки или смерзании блинчатого льда;

*серо-белый лед* — молодой лед толщиной 15—80 см, в отличие от серого льда уже торосящийся при сжатиях и в меньшей степени насланяющийся, в свежих разломах имеет серо-белый цвет;

*тонкий однолетний белый лед* толщиной 80—70 см, развивающийся из молодого льда, существует не более одной зимы, имеет устойчивый снежный покров, в неарктических морях является предельной возрастной стадией;

*однолетний лед средней толщины* толщиной 70—120 см, имеющий более развитый и уплотненный снежный покров с застругами и наддувами и значительную торосистость;

*толстый однолетний лед* достигает к весне толщины 150—200 см, а в высоких широтах при незначительном снежном покрове даже 240 см; толщина снега в наддувах и сугробах у гряд торосов может достигать 100—150 см;

*остаточный однолетний лед* — не растаявший за лето и находящийся в новом цикле намерзания;

*двухлетний лед* — просуществовавший более одного года и достигший к концу второй зимы 2 м и более;

*многолетний лед* с оттенками голубого цвета толщиной до 8 м и более — просуществовавший более двух лет.

Последние пять видов льда встречаются лишь в арктических районах. Если припай состоит из льда нескольких возрастных характеристик, то запись в книжке наблюдений начинают с преобладающего вида льда в данном районе моря.

В книжку ледовых наблюдений записывают имеющиеся в данном районе моря формы неподвижного льда:

*припай* — основная форма неподвижного льда, который образуется вдоль побережья, представляющая сплошной ледяной покров, прикрепленный к берегу, ледяной стене, ледяному барьеру, находится между отмелями или севнями на мелъ айсбергами. Во время изменения уровня моря можно наблюдать его вертикальные колебания;

*ледяной заберег* — первоначальная стадия формирования припая, образуется у берегов, состоит обычно из ниласа или склянки и достигает ширины 100—200 м;



*подошва припая* — часть припая, примерзшая непосредственно к берегу и отделенная от более мористой части припая трещиной, так как не подвержена вертикальным колебаниям при изменении уровня моря;

*донный лед* — любой лед, находящийся под водой у дна;

*лед, скрепленный с грунтом*, — плавучий лед, севший на мель;

*стамуха* — торосистое, сидящее на мели ледяное образование, встречаются отдельные стамухи и барьеры (или цепочки) стамух;

*лед на берегу* — нагромождение льда на пологом берегу.

9. Определение возрастных характеристик и форм плавучего льда производят визуально на видимой акватории моря. По возрастным характеристикам плавучий лед подразделяется следующим образом.

Начальные виды льдов — общий термин для недавно образовавшегося льда:

*ледяные иглы* — кристаллы льда в виде игл или пластинок, образующихся на поверхности воды или в ее толще;

*ледяное сало* — скопление на поверхности воды смерзшихся ледяных игл в виде пятен или тонкого сплошного слоя серовато-свинцового цвета;

*снежура* — выпавший на поверхность моря, свободную ото льда, снег, пропитанный водой и представляющий собой вязкую массу;

*шуга* — скопление пористых кусков льда белого цвета, достигающих нескольких сантиметров в поперечнике, образуется из ледяного сала или снежуры, а иногда из донного льда;

*склянка* — тонкий прозрачный лед в виде блестящей хрупкой корки толщиной до 5 см, образуется из ледяных игл или ледяного сала при спокойном состоянии моря.

К основным возрастным характеристикам плавучего льда относятся также все возрастные характеристики припая.

Основные формы плавучего льда:

*ледяное поле* — любой относительно плоский кусок морского льда более 500 м в поперечнике. Ледяные поля по горизонтальным размерам подразделяются следующим образом: *гигантские ледяные поля* — более 10 км в поперечнике; *обширные ледяные поля* — от 2 до 10 км в поперечнике; *большие ледяные поля* — от 0,5 до 2 км в поперечнике;

*обломки ледяных полей* — льдины от 0,1 до 0,5 км в поперечнике;

*крупнобитый лед* — льдины от 20 до 100 м в поперечнике;

*мелкобитый лед* — любой относительно плоский кусок морского льда от 2 до 20 м в поперечнике;

*блинчатый лед* — лед обычно круглой формы от 0,3 до 3 м диаметром, толщиной до 10—15 см, с приподнятыми краями, образуется на легкой волне из ледяного сала, шуги или снежуры, а также в результате разлома склянки, ниласа и серого льда в условиях большой зыби;

*тертый лед* — битый лед от 0,5 до 2 м в поперечнике;

*ледяная каша* — измельченный и стертый лед, являющийся конечной стадией дробления льда;

*несак* — большой торос или группа смерзшихся торосов, представляющих собой отдельную льдину с большой осадкой, находящуюся на плаву. Может выступать над уровнем моря на высоту до 5 м.

При наличии плавучих льдов нескольких возрастных характеристик и форм отмечают только три вида, занимающие наибольшие площади. Виды льда, покрывающие менее 10 % всей площади, в книжку наблюдений не записывают.

10. Определение торосистости припая и плавучего льда производят в баллах (по шестибалльной шкале). Степень торосистости льда независимо от высоты торосов выражается отношением площади, занимаемой торосами, к площади всего льда. Различают следующие виды торосов: *отдельные торосы*; *гряды торосов*; *барьер торосов*, состоящий из гряд торосов, сидящих на грунте; *полос торосения* — несколько параллельных гряд торосов на плавучем льду или припая, представляющих нагромождение битого льда; *подсои* — образуются при наползании плоских льдин друг на друга.

Баллы торосистости записывают в книжку наблюдений и отмечают на карте-бланке, также отмечают и характер торосистости. Если торосистость припая и плавучего льда на разных участках моря различна или если различные виды льда имеют равную торосистость, то в книжке наблюдений указывают преобладающий балл торосистости. В противном случае записывают два крайних балла.

11. Определение разрушенности припая и плавучего льда производят визуально в баллах (по шестибалльной шкале) на основании признаков таяния или механического разрушения. Кроме оценки разрушенности льда, в книжке наблюдений делают зарисовки различных форм разрушения: *льдин с козырьком*, *льдин с торосами*, *грибовидных льдин*. Признаки таяния и разрушения льда появляются в определенной последовательности, а качественное изменение ледяного покрова связано с повышением температуры воды и воздуха и солнечной радиацией. Наблюдения за разрушением льда начинают с весеннего таяния.

12. Определение заснеженности припая производят в зимний период, с момента устойчивого образования припая до начала таяния, в соответствии со специальной четырехбалльной шкалой. Практическое значение степени заснеженности заключается в том, что, являясь теплоизолятором, снежный покров влияет на нарастание и таяние льда.

13. Определение загрязненности припая и плавучего льда выполняют по его внешним признакам по четырехбалльной шкале в течение всего ледового периода. Наблюдения за загрязненностью, а также за цветом льда дают дополнительные характеристики ледяного покрова, иногда позволяющие уточнить динамику льда. При выполнении наблюдений отмечают степень загрязненности, цвет примесей (грязи) на льду и их происхождение (минеральное, органическое).

14. Определение сжатия плавучего льда осуществляют только для льдов сплошностью не менее 9—10 баллов и не моложе серых молодых льдов по четырехбалльной шкале. Зоны сжатых торосистых льдов образуются под воздействием ветра и течений. Степень их сжатия характеризует проходимость льдов судами.

15. Определение скорости и направления дрейфа льда выполняют при ежедневных ледовых наблюдениях визуально или с помощью различных приборов и приспособлений. При визуальных на-

блюдениях направление дрейфа льда определяют с помощью ориентирного столба или компаса. При этом в книжке наблюдений отмечают направление движения льда по восьми основным румбам.

16. Определение добавочных характеристик ледовой обстановки производят путем осмотра всей видимой акватории моря в сроки основных ледовых наблюдений и между сроками. В книжку наблюдений записывают все особенности распределения льдов и состояния ледяного покрова, которые могут прямо или косвенно дополнительно характеризовать мощность, прочность и проходимость льдов, а также все крупные изменения льдов и состояния ледяного покрова, происходящие между сроками наблюдений.

17. Зарисовка ледовой обстановки включает в себя нанесение ледовой обстановки в поле на планшет с последующим заполнением отчетной карты-бланка, которую составляют в одном из следующих масштабов: 1:50 000, 1:150 000, 1:200 000. Масштаб выбирается в зависимости от размеров видимой акватории моря, но размер карты-бланка не должен превышать 18×24 см. На карту-бланк условными обозначениями наносят все элементы ледовой обстановки.

18. Измерение толщины льда, высоты и плотности снега на льду в постоянной точке выполняют в различные периоды ледового сезона через равные промежутки времени. Плотность снега измеряют через пять дней. При высоте снежного покрова менее 5 см плотность не измеряют. Систематическое измерение толщины льда и снега, а также подледной пути проводится для изучения нарастания и таяния ледяного покрова. Измерения проводят на двух постоянных участках льда в пределах припая: основном и дополнительном, которые в течение зимы остаются в спокойном состоянии. Здесь не должно быть сильных течений, стока береговых вод и влияния других факторов, искажающих ход естественного нарастания и таяния льда.

Основной участок выбирают в некотором удалении от берега на глубине более 2 м. Наблюдения на этом участке проводят систематически, но при полной безопасности выхода на лед. Дополнительный участок выбирают вблизи берега у мористого конца пирса (дамбы, волнолома и т. п.) на глубине, большей максимально возможной толщины льда. На этом участке наблюдения проводят с момента образования припая до начала систематических наблюдений на основном участке и продолжают их весной, когда становится опасным выполнение наблюдений на основном участке.

Для получения лунок во льду, их подготовки, а также измерения толщины льда и снега служат пешня, ледовые буры, ледемерные рейки и снегомеры.

Пешня — простейшее приспособление для пробивки лунок во льду, представляющее собой металлический стержень клинообразной формы.

Бур ледовый ГР-7 состоит из спирального сверла диаметром 69 мм, позволяющего сверлить лед толщиной до 1200 мм, и коловорота с патроном для закрепления сверла. Входящая в комплект ледемерная рейка представляет собой стальную полосу сечением 1×120 мм с сантиметровыми делениями, оцифрованными через 10 см.

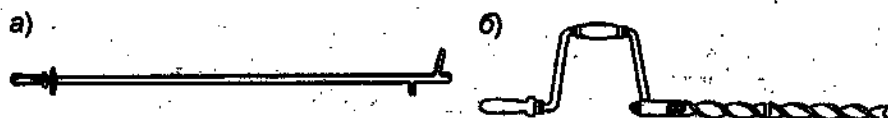


Рис. 14.1. Бур ледовый ГР-102.

а — ледомерная рейка, б — внешний вид бура.

Бур ледовый ГР-102 (рис. 14.1 б) состоит из спирального сверла диаметром 42—45 мм и длиной до 1000 мм, а также коловорота с патроном. Каждый бур снабжен ледомерной рейкой (рис. 14.1 а), с помощью которой через высверленные во льду отверстия производится измерение толщины льда.

Бур ледовый кольцевой ПИ-8 (рис. 14.2) предназначен для сверления отверстий во льду с одновременным получением центрального образца — керна. Бур состоит из режущей части, выполненной в виде кольца, несущего на себе резец, штангу и коловорот. Кольцо в поперечном сечении имеет клинообразный профиль с острой нижней кромкой, представляющей кольцевой нож. В кольце сделан сплошной вырез шириной 25—30 мм, на торцевой стороне одного из концов которого укреплен зубчатый резец с шестью остро заточенными зубьями. Используются кольца диаметром 120, 180, 220 и 310 мм.

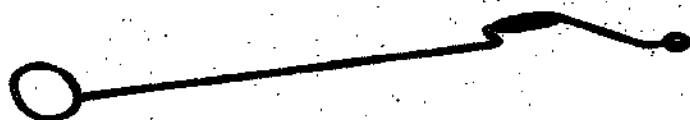


Рис. 14.2. Бур ледовый кольцевой ПИ-8.

Бур ледовый механизированный ГР-58 предназначен для бурения ледяного покрова с целью измерения толщины льда, глубины и температуры воды. Бур представляет собой установленный на легких санках агрегат, состоящий из бурового комплекта, электродрели и генератора. Буровой комплект состоит из спиральных буров диаметром 70 и 100 мм. Бур диаметром 100 мм снабжен удлинителем, позволяющим сверлить лед толщиной до 2 м (а без удлинителя — до 1,2 м). Вращение бура осуществляется электродрелью, источником энергии для которой служит генератор. В качестве генератора используется электродвигатель постоянного тока, работающий в генераторном режиме. Для вращения генератора служит двигатель бензозомоторной пилы «Дружба-60».

В последнее время при исследовании мощных ледяных образований стали широко использоваться установки для термического бурения.

Малогабаритная термобуровая установка (МТБУ) предназначена для получения лунок малого диаметра с отбором керна методом бурения-плавления снежно-фирновых и ледниковых отложений. В комплект МТБУ входят: буровой снаряд МТБС-100, пульт управления, соединительные кабели, сани, мачта, лебедка, грузонесущий кабель. МТБС-100 состоит из колонки нагревателя, колонковой трубы, переходника, кабельного замка и шламособорника. Бурение

осуществляется путем плавления льда по кольцевому забою за счет контактной передачи тепла от колонки-нагревателя. Наплавленная вода забоя удаляется с помощью желонки после каждого рейса бурения.

#### Технические характеристики

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| Глубина бурения, м .....        | < 50    |
| Диаметр бурения, мм .....       | 102     |
| Диаметр зерна, мм .....         | 65      |
| Проходка за рейс, м .....       | 1,5     |
| Мощность нагревателя, кВт ..... | 0,7—1,5 |
| Напряжение питания, В .....     | 180—220 |
| Длина снаряда, м .....          | 2,4     |
| Масса снаряда, кг .....         | 12,8    |

Наиболее активным способом является бурение с помощью горячей воды. Вода, нагретая до 80—90 °С, из парогенератора с помощью ручного насоса подается к месту бурения лунки через дюралюминиевую штангу диаметром 40 мм с внутренней теплоизоляцией, снабженную на конце медным теплообменником. По мере увеличения глубины лунки наращивается штанга термобурового снаряда (до 1,3—1,5 м). В течение всего периода бурения лунки регистрируется скорость проходки, соответствующая относительной прочности льда, отмечаются горизонты и мощности пустот и т. п. Технические характеристики некоторых термобуровых установок приведены в табл. 14.1.

В месте предполагаемой лунки определяют толщину и плотность снега. Затем поверхность льда площадью 0,3—0,5 м<sup>2</sup> очищается от снега, после чего пробивается лунка. Толщина льда измеряется ледомерной рейкой, опускаемой в лунку строго вертикально, причем подкос рейки подводится под нижнюю поверхность льда. Первый отсчет производится по делению рейки, противостоящей верхней поверхности льда, а второй — на уровне воды в лунке, что позволяет определить глубину погружения льда. При наличии двухслойного льда общей толщиной льда является толщина обоих слоев льда. Толщина прослойки воды между двумя слоями льда указывается в примечаниях. По окончании всех этих наблюдений определяется глубина моря.

Высоту снежного покрова определяют с помощью переносной деревянной или металлической снегомерной рейки, которая строго вертикально ставится на льду с ненарушенным снежным покровом в трех-четыре местах в 3—5 м с разных сторон от будущей лунки.

Таблица 14.1

Термические средства бурения льда

| Термобур                  | Глубина бурения, м | Диаметр лунки, см | Диаметр зерна, см | Скорость проходки, м/ч | Мощность нагревателя, кВт |
|---------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| ЭТБЛК                     |                    | 15,0              | 9,0               | 2,5                    | 5,5                       |
| ТЭЛГА-2                   | 190                | 15,4              | 7,1               | 1,6                    | 3,0                       |
| ТЭЛГА-3                   | 217                | 18,0              | 11,4              | 1,5                    | 6,9                       |
| ЭТИ-1 (электронгла) ААНИИ | 310                | 4,5               |                   | 5,0—15,0               | 1—3                       |
| ЭТБ-8 (керновой) ААНИИ    | 447                | 2,0               |                   | 2,0—6,0                | 1—3                       |

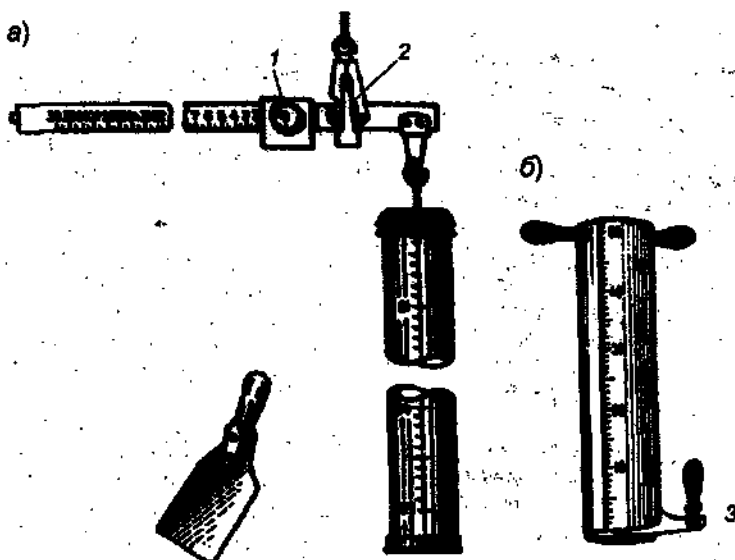


Рис. 14.3. Весовой снегомер ВС-48.

Усл. обозначения см. текст.

По отсчетам со снегомерной рейки выводится средняя высота снежного покрова. Отсутствие снега в каком-либо направлении не меняет способа осреднения.

Для определения плотности снега на льду используется весовой снегомер ВС-48 (рис. 14.3), состоящий из металлического цилиндра и весов. На одном конце цилиндра имеется кольцо с режущими зубьями, а другой его конец может закрываться крышкой.

Для измерения высоты вырезаемого столба снега по образующей цилиндра с наружной стороны нанесена сантиметровая шкала, нуль которой совпадает с нижним срезом цилиндра. Весы снегомера состоят из металлической линейки, которая опорной призмой (2) делится на два неравных плеча. Длинное плечо линейки, по которой скользит передвижной груз (1) с вырезом, разбито на деления ценою 5 г. К концу короткого конца линейки подвешивается металлический цилиндр длиной 700 мм и площадью поперечного сечения  $50 \text{ см}^2$ .

При измерениях прибор острыми краями погружается отвесно в снег до поверхности льда, после чего делается отсчет высоты снега по наружной шкале цилиндра. Перед выниманием цилиндра со снегом во избежание высыпания содержимого под нижний край цилиндра подводится лопатка (3). Вынутый цилиндр переворачивается отточенным краем вверх, очищается от снега, прилипшего к наружной стороне, и взвешивается. При высоте снега более 60 см, т. е. более высоты цилиндра, определение плотности снега производится по частям, затем полученные результаты суммируются.

Масса пробы снега в граммах соответствует отсчету по шкале линейки весов, умноженному на 5 (цена деления линейки). Объем

пробы равен отсчету по наружной шкале цилиндра, умноженному на 50 (площадь поперечного сечения цилиндра, см<sup>2</sup>). Таким образом, плотность снега выражается отношением массы  $P$  отобранной пробы снега к ее объему  $V$ :  $\sigma = P/V$ . При измерении плотности снега необходимо выяснить также, нет ли в снегу, толщина которого измеряется, ледяной корки; результат записывается в книжку наблюдений.

К специальным наблюдениям, выполняемым по особой программе, относятся: 1) профильные ледовые наблюдения и маршрутные съемки; 2) наблюдения за стаиванием снега и льда; 3) наблюдения за температурой снега и льда; 4) полигонные съемки; 5) определение физико-химических свойств льда; 6) изучение структуры льда; 7) определение преобладающих размеров плавучих льдин и высоты торосов.

1. Профильные ледовые наблюдения и маршрутные съемки необходимы для систематического изучения состояния припая в зависимости от гидрометеорологических условий. Эти наблюдения заключаются в определении толщины припая, высоты и плотности снега на определенных профилях (разрезах); описании характера поверхности ледяного покрова (общий характер поверхности, высота торосов, наличие снежниц, проталин и др.). Кроме того, по специальному указанию выполняются дополнительные наблюдения: описание видимой структуры льда; метеорологические и гидрологические наблюдения и т. п.

По своему характеру профильные ледовые наблюдения могут быть маршрутными, большей частью стандартными разрезами и съемками ледяного покрова, охватывающими иногда значительные районы моря. Эти районы обычно ограничиваются зонами припая, подходами к портам и акваториями портов, ледовыми трассами и аэродромами.

В арктических морях, кроме профильных ледовых наблюдений, выполняются маршрутные съемки ледяного покрова для получения сведений о состоянии припая, необходимых для выбора пути при проводке судов. Направление и протяженность маршрутов определяются шириной и торосистостью припая, а кроме того, наличием транспортных средств, в качестве которых используются вездеходы, автомобили, собачьи упряжки. Маршрутные съемки обычно выполняют перед началом и по окончании полярной ночи, а также за 10—15 дней до взлома припая. По результатам съемки составляются схемы, характеризующие состояние льда по маршрутам. Эти схемы выполняются в условных обозначениях в удобном масштабе.

2. Наблюдения за стаиванием снега и льда начинаются весной еще при отрицательной температуре воздуха и льда. Вначале их выполняют один раз в 3—5 дней, а затем, после появления положительных значений температуры, ежедневно. Наблюдения производятся с помощью пяти Г-образных деревянных реек, в замороженных в лед в районе измерения толщины льда, расположенных в 10—20 м одна от другой, в местах с разной высотой снега. Рейка длиной 2—3 м

и шириной 25—35 см вмораживается в лунку глубиной несколько менее толщины льда. Для предохранения рейки от быстрого вытаивания лунка заполняется талой водой. Разность в отсчетах расстояний от поверхности снега и льда до нижней поверхности горизонтального откоса рейки между сроками наблюдений составляет соответственно величины стаивания снега и льда.

3. Наблюдения за температурой снега и льда, как правило, выполняются 5, 10, 15, 20, 25-го числа и в последний день каждого месяца в одно и то же время вблизи (не далее 6—10 м) одной из постоянных точек измерения толщины льда. Температура льда и снега измеряется с помощью электротермометрической установки М-54-2, состоящей из комплекта датчиков температуры (десять ПТС в виде сопротивлений с бескаркасной обмоткой, заключенных в тонкостенную латунную гильзу) и измерительного пульта, соединенных между собой 12-жильным кабелем длиной 120 м. ПТС, предназначенные для измерения температуры снега, крепятся на деревянной рейке, вмороженной в лед, и располагаются над поверхностью льда на горизонтах 10, 20, 30, 40 см и выше в зависимости от толщины снега, причем один из ПТС обязательно помещается на поверхности снежного покрова. Для измерения температуры льда ПТС помещаются на горизонтах 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250 см от поверхности льда.

4. Полигонные съемки проводятся для изучения пространственной неоднородности физико-механических свойств мористого льда. В зависимости от поставленных задач полигон разбивается регулярной сеткой с шагом 10—20 м. В каждой точке выбуриваются керны льда для определения основных показателей физико-механических свойств мористого льда и выделения на их основе зон с различными параметрами. В дальнейшем отбираются керны льда для исследования зависимости механических свойств льда от его физического состояния. В отдельных случаях выполняются визуальные наблюдения за видимым строением льда, которые проводятся на монолитах («кабанах»), выкалываемых с помощью пешни, или на кернах (колонках льда), отбираемых кольцевым буром. Строение льда наблюдают на фоне темного предмета при боковом освещении, используя лупу, линейку и циркуль-измеритель.

Визуальные наблюдения позволяют определить: прозрачность льда, выделяя при этом прозрачные, полупрозрачные и непрозрачные слои; наличие во льду воздушных и солевых включений, их форму и размер (по форме включения разделяются на сферические, цилиндрические и волокнистые); характер распределения включений, т. е. равномерное или неравномерное расположение их по толщине льда, причем особо фиксируются места скопления воздушных и солевых включений; наличие в толще льда других включений, таких как минеральные — песок, глина, ил — и органические — микроорганизмы, водоросли и т. п., причем отмечаются особенности их распределения — прослойки, гнезда или отдельные разрозненные включения. Каждое описание сопровождается схематической зарисовкой строения льда в масштабе 1:5, а при толщине льда более 1 м — в масштабе 1:10.



5. Определение физико-механических свойств льда заключается в следующем: изучение строения, температуры и солености льда; проведение механических (статических и динамических) испытаний образцов льда в лабораторных условиях; использование методов неразрушающего контроля для измерения параметров состояния льда.

Данные механических испытаний по определению прочности на сжатие и изгиб, а также по измерению характеристик деформированности (модуль деформации и коэффициенты вязкости льда) являются необходимым аргументом при расчете ледовых нагрузок. Прочность морского льда является основным расчетным параметром при определении горизонтального давления льда на вертикальные преграды.

Определение прочности на изгиб проводится на основе испытаний образцов (балок и плит) и ледяных балок на плаву, выпиленных на всю толщину льда в натуральных условиях по схеме, приведенной в табл. 14.2. Прочность на изгиб определяется по предельному значению изгибающего момента на основе технической теории изогнутых балок и плит.

Условия проведения исследований прочностных свойств льда заключаются в следующем:

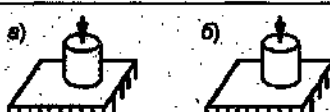
- отбор образцов льда (кернов) для испытания на одноосное сжатие производится на двух взаимно перпендикулярных профилях длиной 100 м в точках через каждые 20 м кольцевым буром (иногда вырубается «кабан»);

- работы на профиле в районе припая выполняются ежедекадно после достижения льдом толщины 0,8 м до начала разрушения ледяного покрова. На дрейфующем льду работы выполняются в период проведения экспедиционных исследований;

- с целью сохранения ненарушенной структуры льда и предотвращения процесса сублимации образцы следует хранить при температуре не выше  $-15^{\circ}\text{C}$  в пластиковых мешках;

Таблица 14.2

Схема испытаний образцов льда на сжатие и изгиб

| Вид испытания | Схема испытания                                                                     | Мощность, МПа |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Сжатие        |  | 1,0–8,0       |
|               |  |               |
| Изгиб         |  | 1,0–2,0       |
|               |  |               |

— при температуре выше  $-15^{\circ}\text{C}$  испытания образцов должны производиться не позднее 2 ч после отбора кернов, при этом образцы льда должны храниться в термостате;

— нагрузочные устройства должны обеспечивать постоянные во времени скорости деформирования образца в пределах  $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;

— для снижения эффекта влияния прокладок пресса на результаты опыта рекомендуется использовать прокладки из низкомолекулярного упругого материала (типа твердой синтетической резины), заключенного в металлическую обойму, диаметром, незначительно превышающим диаметр испытываемого образца;

— рекомендуется использовать для испытаний образцы призматической или цилиндрической формы диаметром (шириной) 0,07—0,1 м и высотой в 2—2,5 раза больше поперечных размеров. Допускается использование образцов с отношением размеров 1:1;

— для обеспечения параллельности торцовых сечений образцов их подвергают механической обработке, оплавление торцовых поверхностей не допускается;

— средний поперечный размер образца должен быть в 15—20 раз больше поперечного размера кристалла льда. При отсутствии данных о размерах кристаллов рекомендуется использовать образцы размером 0,15×0,15 м;

— используемая при измерениях аппаратура должна иметь отрицательную температуру и тарироваться перед испытаниями;

— необходимо предварительно устанавливать собственную деформацию установки с учетом применяемой нагрузки;

— прочность на изгиб и статический модуль деформации определяются путем испытания на плаву консольных балок и плит с трех- и четырехточечным приложением нагрузок при времени разрушения порядка 1 с;

— длина и ширина балок должны быть равны соответственно  $7 \dots 10 h$  и  $1 \dots 2 h$  ( $h$  — толщина льда);

— при испытании балок на плаву следует определять профили температуры и солености льда по их толщине.

6. Исследование кристаллографической структуры льда обычно требует приготовления тонких срезов (шлифов), получаемых различными способами. Один из них заключается в замораживании образца льда в стеклянной кювете и последовательном снятии слоев льда толщиной около 0,5 мм. Этот метод пригоден для определения ориентации зерен и для общей структурной классификации (зернистая, столбчатая и т. д.). При полевых испытаниях для получения шлифа можно использовать острый ручной строгальный резец, например скобель, или применять метод теплой пластины (метод оплавления), за ними обязательно должно следовать исследование структуры льда. Это исследование обычно включает измерения ориентации кристаллов и размеров зерен и определение различных включений (например, воздушные пузырьки и т. д.). Ориентацию кристаллов льда, т. е. направление С-оси относительно горизонтальной плоскости, и размеры зерен можно определить с помощью поляризационного микроскопа (например, МП-2). Любое кристаллографическое исследование должно за-

канчиваться фотографированием тонких срезов в поляризованном свете. По результатам исследований изучаемый лед относят к тому или иному типу по классификации Н. В. Черепанова, в основу которой положены условия ледообразования и соленость воды. Леды природных водоемов подразделяются на четыре основные группы.

Первая группа — льды, образующиеся в пресных или сильно распресненных ( $S < 2\text{‰}$ ) водоемах. Обозначаются индексом А.

Вторая группа — льды, образующиеся в распресненных районах ( $S = 2...24,7\text{‰}$ ). Обозначаются индексом Б.

Третья группа — льды морских водоемов ( $S > 24,7\text{‰}$ ). Обозначаются индексом В.

Четвертая группа — льды, образующиеся в результате метаморфического преобразования длительно существующего ледяного покрова, подвергнувшегося термическому и динамическому метаморфизму. Льды этой группы обозначаются индексом Г.

Каждая группа льдов в зависимости от условий образования и характеристики структуры делится на отдельные типы, для обозначения которых введены дополнительные цифровые индексы. Так, в группах пресноводного (А) и морского льда (В) выделяется по девять типов. Разнообразие структурных типов льдов в первых трех группах от начальной стадии формирования первичного слоя льда до ориентированного роста агрегата кристаллов во многом определяется условиями ледообразования.

7. Определение преобладающих размеров плавучих льдин и высоты торосов в основном выполняют с помощью волномера-перспектометра ГМ-12 с установкой его горизонтальной оси над уровнем моря с точностью до 0,1 м и на расстоянии от места наблюдений не более 1,5 км. При определениях на различном удалении от берега измеряют 10 льдин, преобладающих по величине в этом районе, и вычисляют среднее значение. Кроме того, измеряют размеры трех небольших льдин. Причем при определении размера каждой льдины необходимо указывать возрастную характеристику льда, из которого она состоит.

В последнее время для определения ледовой обстановки широко используются радиолокационные наблюдения. Использование для подобной цели радиолокационных станций позволяет производить наблюдения в любое время суток и практически независимо от гидрометеорологической обстановки.

### 14.3. Наблюдения за льдами с судна

Состав ледовых наблюдений несколько различается в зависимости от того, находится ли судно на ходу (во льдах или вблизи их), в дрейфе или стоит на якоре. На ходу судна ведутся следующие основные наблюдения: 1) определение возрастных характеристик и форм льда; 2) определение количества плавучего и неподвижного льда, а также густоты плавучего льда; 3) определение толщины льда и снега на нем (с борта судна); 4) определение торосистости и высоты торосов; 5) наблюдения за сжатиями и разрежениями льда; 6) оцен-

ка степени разрушенности льда; 7) оценка проходимости льдов судами; 8) наблюдения за дрейфом льда; 9) картирование льдов.

При плавании вблизи кромки льда определяют ее пеленг, расстояние до нее от судна и ее ориентацию (например, с ЮВ на СВ). Все вышеперечисленные наблюдения выполняются с судна, лежащего в дрейфе или стоящего на якоре, кроме определения толщины льда и снега на нем, в случае если выход на лед опасен. Сроки наблюдений: 00, 06, 12 и 18 ч по среднему гринвичскому времени. Все наблюдения за льдами с судна сопровождаются гидрометеорологическими наблюдениями. Основные виды наблюдений с судна выполняются по той же методике, что и при наблюдениях с берега. Остановимся лишь на отличительных методиках наблюдений.

Определение толщины льда и снега на нем на ходу судна можно проводить различными способами, простейший из которых основан на глазомерной оценке толщины льдин, становящихся зачастую на ребро у борта судна. При этом уплотненный и пропитанный водой снег не скатывается со льдин. Оценку толщины льда и снега на нем обычно производят по определению толщины не менее 10 льдин в достаточно сплоченном льду.

Измерения толщины иногда выполняют с помощью артиллерийского бинокля, на стекле которого нанесена сетка с ценой деления 0,01 расстояния от глаз наблюдателя до измеряемого предмета. Поэтому во время измерений необходимо знать высоту глаз наблюдателя (который обычно находится на крыле мостика) от поверхности льда. Эти измерения можно выполнять также и с помощью рейки-выстрела длиной 80—100 см с делениями через 10 см, окрашенными попеременно в белый и черный цвет; рейка устанавливается под крыльями мостика на уровне верхней палубы. Находящийся над рейкой наблюдатель при прохождении под ним льдины, стоящей на ребре, снимает отсчет числа делений на рейке, соответствующего толщине льдины. А цену деления рейки  $e$  можно вычислить по формуле

$$e = [(H_r - H_p)/H_p] \cdot 10 \text{ см},$$

где  $H_r$  — высота глаз наблюдателя;  $H_p$  — высота рейки.

Для измерения высоты торосов также используют артиллерийский бинокль с измерительной сеткой. При этом расстояние до торосов определяют с помощью дальномера или локатора. Расчет высоты  $h$  тороса определяют по формуле

$$h = 0,01nl,$$

где  $l$  — расстояние до тороса;  $n$  — отсчет по сетке в сотых долях  $l$ .

При наблюдении за сжатиями и разрежениями дрейфующего льда рекомендуется пользоваться следующей градацией характеристик, упрощающих запись этих наблюдений: сильно сжатый лед; сжатый лед; лед на расплыве, т. е. лед сплоченностью 8—10 баллов, начавший разрезаться после сжатия; разрезающийся лед — лед, сплоченность которого уменьшается.

Оценку проходимости льдов судами определяют по следующим признакам: 1) судно идет самостоятельно, под проводкой или на бук-

сире у ледокола; 2) судно идет, лавируя между льдинами, раздвигая льдины или валамывая лед; 3) судно продвигается вперед, работая ударами, и как часто к ним прибегает; 4) если судно идет в составе каравана, то из скольких судов состоит караван, какую дистанцию удастся держать между судами и как успешно продвигается караван. Для оценки проходимости льдов важно знать скорость судна во льдах, которую выражают в процентах от скорости по чистой воде при том же режиме работы двигателя. По всем этим данным определяют проходимость льдов в баллах по специальной шкале.

Производя ледовые наблюдения часто осуществляют фотографирование ледяных объектов, а для дешифрирования фотографий необходимо точно знать высоту объектива над ледяной поверхностью и фокусное расстояние фотоаппарата. Результаты судовых ледовых наблюдений наносят на бланковые карты с помощью условных обозначений. Картированию подлежат льды материкового происхождения, встречающиеся в море. Они делятся на неподвижные и дрейфующие.

К неподвижным льдам материкового происхождения относятся:

*язык ледника* — часть ледника, сильно выдвинутая в море, находящаяся на плаву и иногда простирающаяся от берега на многие десятки миль, имеет большую ширину;

*шельфовый лед* — ледовые образования, формирующиеся в результате накопления фирно-снеговых масс в течение нескольких лет на многолетнем припайном льду, возвышающиеся над уровнем моря более чем на 2 м и обычно имеющие волнообразную поверхность;

*ледяной барьер* — край ледникового языка или шельфового льда, возвышающийся над уровнем моря от 2 м до нескольких десятков метров.

К дрейфующему льду материкового происхождения относятся:

*айсберг* — отделившаяся часть ледника-глетчера или шельфового льда, дрейфующая в море и имеющая высоту свыше 5 м над уровнем моря;

*ледяные дрейфующие острова* — огромные обломки шельфового льда с волнистой поверхностью длиной 15 миль и более, дрейфующие в Северном Ледовитом океане.

Айсберги бывают: *столообразные* — плосковершинные айсберги, имеющие большие горизонтальные размеры, особенно в Южном океане (так, норвежское судно «Оуд 1» у острова Шпицова (Кларенс) в январе 1927 г. встретило айсберг площадью 82 400 км<sup>2</sup> и высотой над уровнем моря более 40 м); *пирамидальные* — айсберги, имеющие остроконечную неправильной формы вершину и сравнительно малые горизонтальные размеры. *Язык айсбергов* — ряд айсбергов, расположенных у берега в виде цепочки и удерживающихся на месте сцеплением с грунтом или соединенных между собой неподвижными перемычками; *обломки айсберга* — значительные глыбы льда, отломившиеся от айсберга или от ледника и возвышающиеся не более чем на 5 м над уровнем моря; *куски айсберга* — малые по величине обломки айсберга.

Наблюдения за айсбергами проводятся с помощью десятибалльной (от 0 до 9 баллов) шкалы сплошенности айсбергов. Глубина погружения айсбергов определяется удельным весом льда и зависит в основном от наличия во льду пузырьков воздуха. В среднем это соотношение составляет 1:5, т. е. пять частей высоты айсберга находятся под водой.

#### 14.4. Наблюдения за льдами с летательных аппаратов

Все вышеперечисленные методы наблюдений за льдами основаны, как правило, на проведении работ в отдельных точках, выполнявшихся к тому же не всегда регулярно (особенно во время экспедиционных исследований). Все это не позволяло получать целостную картину распределения и динамики льдов не только в отдельных морях, но и в более обширных районах океанов. Такая возможность появилась после изучения ледяного покрова с воздуха.

Впервые наблюдения за морскими льдами с воздуха были приняты еще в 1897 г. Соломоном Андреем с воздушного шара при попытке достичь на нем Северного полюса. В 1918 г. начальник экспедиции на л/п «Таймыр» и «Вайгач» Б. А. Вилькицкий предложил и обосновал возможность использования самолета для ледовой разведки. Попутная ледовая разведка на самолете была впервые выполнена в августе 1914 г. военным летчиком Я. Нагурским при поисках экспедиции Г. Седова. Широкое развитие мореплавания в Арктике показало насущную необходимость знания ледовой обстановки для успешного проведения навигации. В августе 1924 г. летчик Б. Г. Чухновский совершил девять полетов с целью ледовой разведки. С 1924 г. аэровизуальные наблюдения стали выполняться ежегодно.

Поначалу наблюдения производились экипажами самолетов, но затем, с повышением требований к качеству ледовой информации, в состав экипажей самолетов ледовой разведки были введены бортнаблюдатели-океанологи. Использование авиации в ледовых исследованиях позволило получать регулярную информацию о распределении льдов, выявить важнейшие закономерности формирования, строения и разрушения ледяного покрова, что особенно важно для улучшения краткосрочных и долгосрочных ледовых прогнозов.

При аэровизуальных наблюдениях с малых высот (50—500 м) наблюдатель по характеру поверхности, состоянию снежного покрова, типу наслоений, виду торосистых образований и другим косвенным признакам определяет все основные характеристики ледяного покрова. Однако аэровизуальным наблюдениям присущи недостаточная точность определения характеристик и географической привязки, субъективность оценок и ограниченная полоса обзора. Все это потребовало применения различной аппаратуры при проведении авиационных ледовых наблюдений.

Для научных и режимных исследований ледяного покрова единственным инструментом, хорошо зарекомендовавшим себя, долгое время были аэрофотоаппараты различных конструкций. Результаты анализа и обобщения материалов этих съемок позволили значи-

тельно изменить представление о роли торошения в формировании ледяного покрова, а также выявить блочный характер распределения многолетних льдов и раскрыть многие закономерности динамики и деформации льдов. Но для непосредственной проводки судов, особенно в арктических районах, этот метод не оправдал возлагавшихся на него надежд.

С середины 50-х годов самолеты ледовой разведки стали снабжаться навигационными панорамными радиолокационными станциями. Но им присущи существенные недостатки: низкая разрешающая способность, неравномерная контрастность изображения, большие радиотени при полете на малых высотах, поэтому их использовали лишь для картирования положения кромки льда за пределами визуальной видимости. В начале 60-х годов стали применять радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО), имеющие по сравнению с панорамными РЛС на порядок более высокую разрешающую способность. У нас в стране в НПО «Ленинец» (Санкт-Петербург) были разработаны два типа РЛС БО: «Торос» в 1968 г. и «Нить» в 1972 г. В 1972 г. в Рижском институте инженеров гражданской авиации был разработан способ измерения толщины морского льда с помощью последовательности видеосигналов и создан бортовой макет радиолокационного импульсного измерителя толщины морского льда.

К 1960 г. можно отнести начало спутниковых ледовых наблюдений, когда с запущенного в США ИСЗ «Тайрос-1» была проведена телевизионная съемка, правда, в основном облачности. Затем для этой цели использовались спутниковые системы ЭССА, «Нимбус», НУОА. В 1966 г. был запущен отечественный ИСЗ «Космос-122» — пионер спутниковых ледовых наблюдений в СССР. И уже к 70-м годам спутниковая информация широко использовалась как дополнение к ледовым авиаразведкам. К настоящему времени уже ряд отечественных и зарубежных спутников («Алмаз», ERS-1) оборудованы радиолокационными станциями бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА), которые по своим тактико-техническим данным аналогичны самолетным РСА и РЛС БО (разрешение 25—30 м, полоса обзора 80—100 км). В начале 80-х годов были разработаны и внедрены в практику ледовых наблюдений спутники с комплексами бортовой аппаратуры, включающими сканирующие радиометры видимого, инфракрасного диапазонов, РСА и РЛС БО; самолеты, оснащенные трассовыми и сканирующими ИК- и СВЧ-радиометрами, радиолокационными измерителями толщины морского льда и современным навигационным оборудованием. И можно сказать, что в 90-е годы аэрокосмические дистанционные методы стали основными в ледовых исследованиях.

При использовании дистанционных методов для ледовых исследований необходимо помнить, что они являются косвенными, позволяющими получать информацию о ледовых характеристиках с помощью альбедо, коэффициента отраженного рассеяния, радиационной температуры и других радиофизических параметров ледяных образований. Поэтому для разработки методов дешифрирования и интерпретации результатов дистанционных измерений их необхо-

можно проводить совместно с контактными методами исследования ледяного покрова. Все это позволяет изучить информационные свойства и технические характеристики средств дистанционного зондирования и выявить прямые и косвенные дешифровочные признаки морских льдов в различные сезоны.

Кроме того, летательные аппараты позволяют с более высокой точностью получать значения некоторых параметров ледяного покрова, что достигается с помощью самолетных и вертолетных десантов в любых районах. С их помощью исследуются пространственная изменчивость возрастных характеристик и форм дрейфующего льда, высота торосов и снежного покрова, а также обеспечивается доставка кернов на береговые базы для изучения физико-механических свойств льда.

Проведение непосредственно контактных исследований льда, выполняющихся в точках, на ограниченных площадках, профилях, совместно с аэрофотографическими, радиолокационными и другими дистанционными измерениями позволило не только выполнить калибровку дистанционных средств, но и статистически оценить распределение изучаемых ледяных образований на прилегающих акваториях и перейти к описанию всего ледяного покрова. Кроме того, наблюдения на специальных калибровочных полигонах всегда позволяли получать информацию о режимных и статистических характеристиках ледяного покрова. Все это дало возможность сравнительно хорошо изучить процессы образования, нарастания, деформации, таяния, снегонакопления, морфометрии верхней поверхности морских льдов, прочностные, теплофизические и электрические характеристики различных льдов.

## 14.5. Исследование нижней поверхности льда

Долгое время совершенно неизученными оставались процессы, происходящие на нижней поверхности льда; ее рельеф, строение подводной части ледяных образований. В 1956 г. В. С. Лоцилов (ААНИИ) впервые провел подледные съемки с помощью двух малогабаритных фотогеодезических, помещенных в водонепроницаемый бокс. С 1969 г. группа под руководством В. Д. Грищенко начала в различных полярных районах подводные наблюдения и исследования с использованием водолазной техники и фото-, кино- и видеосъемки.

Проведение подобных работ, носивших в основном ледовоокеанологическую направленность, позволило получить новые данные о макро- и микрорельефе подводной части морских льдов различных видов и межгодовой изменчивости, а также о связи между параметрами подводного и надводного рельефов. Также выявлены закономерности таяния и нарастания морских льдов под водой при совокупном воздействии различных термодинамических факторов, исследованы особенности морфологии торосов на морских льдах в условиях открытого океана и на мелководье. Проведены исследования тонкой термохалинной и динамической структур приледного слоя моря.



## Глава 15

### АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 15.1. Проблемы развития методов измерений океанологических характеристик

К настоящему времени уже сложились определенные представления о характере изменчивости Мирового океана, что позволяет с единых позиций рассмотреть флуктуации океанологических характеристик и выделить те процессы, которые их вызывают. Оценки изменчивости океанологических характеристик для средних океанических условий приведены в табл. 15.1.

Подобная оценка изменчивости океанологических характеристик позволила сформулировать необходимые требования к измерительной океанографической аппаратуре и методике производства наблюдений, касающиеся точности, чувствительности, продолжительности и пространственно-временной дискретности измерений, их репрезентативности, выбора аппаратуры с оптимальной информативностью. В табл. 15.2 приведены требования к точности измерений температуры и солености морской воды для различных типов изменчивости.

Экспериментальные исследования существующей изменчивости вод Мирового океана во всем ее диапазоне могут обеспечить зондирующие, буксируемые, автономные и специальные информационно-измерительные системы. Большая часть современной аппаратуры, используемой для исследования Мирового океана, представляет собой системы, позволяющие одновременно производить измерения нескольких океанологических характеристик.

Результаты океанологических исследований с помощью подобной аппаратуры позволили выявить сложную картину процессов, протекающих в Мировом океане (сложная система течений, синоптические вихри, тонкая термохалинная структура и т. п.). В результате усложнилась задача создания общей оптимальной теоретической модели, а ее апробирование в натурных условиях требует огромного экспериментального материала о пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических характеристик. При этом, конечно же, возможно создание одинаковых измерителей с различными метрологическими характеристиками и методами использования для каждого масштаба изменчивости с соответствующей корректировкой некоторых характеристик датчиков, дискретности измерений, продолжительности наблюдений и вида первичной обработки.

Кроме того, полученные результаты измерений используются и для расчета с помощью известных функциональных зависимостей

Таблица 15.1

## Оценки изменчивости океанологических характеристик

| Изменчивость    | Характеристики параметров изменчивости          |                                             |                                                        |                             |                   |              |
|-----------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------|
|                 | Временной диапазон<br>$\Delta t$ , с            | Необходимая продолжительность наблюдений, с | Требуемое время осреднения                             | Пространственный масштаб, м | Полнота измерений |              |
|                 |                                                 |                                             |                                                        |                             | $\sigma_t$ , °C   | $\sigma_g$ ‰ |
| Мелкомасштабная | $10^{-1}-10^4$<br>(0,1 с—2,8 ч)                 | $1 \cdot 10^6$<br>(28 ч)                    | $2,5 \cdot 10^{-3}-4 \cdot 10^{-3}$<br>(0,002—0,004 с) | $10^{-4}-10^2$              | -0,06—0,28        | 0,03—0,37    |
| Мезомасштабная  | $10^4-3 \cdot 10^5$<br>(2,8 ч—3,5 сут)          | $3 \cdot 10^6$<br>(35 сут)                  | $2,5 \cdot 10^{-2}-4 \cdot 10^{-2}$<br>(4—7 мин)       | $10^2-50 \cdot 10^6$        | 0,28—0,52         | 0,09—0,30    |
| Синоптическая   | $3 \cdot 10^5-5 \cdot 10^6$<br>(3,5 сут—58 сут) | $5 \cdot 10^7$<br>(1,6 года)                | $0,75 \cdot 10^{-4}-1,2 \cdot 10^{-4}$<br>(2—3,3 ч)    | $5 \cdot 10^3-3 \cdot 10^5$ | 0,52—0,76         | 0,15—0,60    |
| Сезонная        | $5 \cdot 10^6-3 \cdot 10^7$<br>(58 сут—1 год)   | $3 \cdot 10^8$<br>(10 лет)                  | $1,25 \cdot 10^{-5}-2 \cdot 10^{-5}$<br>(36—56 ч)      | $3 \cdot 10^6-10^7$         | 0,76—1,66         | 0,80—1,20    |
| Междугодовая    | $3 \cdot 10^7-3 \cdot 10^8$<br>(1—10 лет)       | $3 \cdot 10^9$<br>(100 лет)                 | $7,5 \cdot 10^{-6}-1,2 \cdot 10^{-6}$<br>(9—14 сут)    | $10^7$ —размеры океанов     | 1,66—2,25         | 1,20—2,00    |

Таблица 15.2

## Необходимые точность и дискретность измерений температуры и солёности морской воды

| Изменчивость    | Средняя квадратическая ошибка результатов измерений |                                    | Дискретность измерений |
|-----------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
|                 | °C                                                  | ‰                                  |                        |
| Мелкомасштабная | $3 \cdot 10^{-3}-15 \cdot 10^{-3}$                  | $2 \cdot 10^{-3}-18 \cdot 10^{-3}$ | 0,05—0,08 с            |
| Мезомасштабная  | $15 \cdot 10^{-3}-3 \cdot 10^{-2}$                  | $5 \cdot 10^{-3}-1 \cdot 10^{-2}$  | 8—10 мин               |
| Синоптическая   | $3 \cdot 10^{-2}-4 \cdot 10^{-2}$                   | $1 \cdot 10^{-2}-3 \cdot 10^{-2}$  | 3—3,5 ч                |
| Сезонная        | $6 \cdot 10^{-2}-8 \cdot 10^{-2}$                   | $1 \cdot 10^{-2}-6 \cdot 10^{-2}$  | 1,5 сут                |
| Междугодовая    | $1 \cdot 10^{-1}-15 \cdot 10^{-2}$                  | $6 \cdot 10^{-2}-1 \cdot 10^{-1}$  | 18 сут                 |

таких параметров, как соленость, плотность, скорость звука в воде и т. п. Подобные косвенные измерения требуют корректного подхода при выборе точности измерений первичных океанологических характеристик. Однако это требование не всегда выполняется при создании измерительных систем, хотя их создатели чаще всего основываются на достижении максимально возможного для каждого из видов измерений научно-технического уровня. В то же время завышение точности измерений отдельных океанологических характеристик, входящих в формулы косвенных определений, приводит к необоснованному усложнению аппаратуры, повышению ее стоимости и снижению надежности. Поэтому определение оптимальных значений при выборе точности измерений отдельных характеристик является актуальной задачей при выполнении косвенных определений. При решении данной задачи целесообразно первоначально определить требуемые предельные точности измерений отдельных характеристик с учетом точности метода расчета вторичного параметра.

В настоящее время перед практической океанологией во всем мире стоит задача создания автоматизированных, малогабаритных, высокоинформативных, простых по конструкции и надежных при эксплуатации в морских экспедиционных условиях информационно-измерительных систем массового сбора и обработки океанологической информации. Под автоматизированной системой понимают совокупность измерительных, вычислительных и регистрирующих средств, объединенных в общую структурную схему с заданными алгоритмами функционирования. Основными элементами системы являются измерительные каналы с датчиками, микроЭВМ или специализированное вычислительное устройство, устройства передачи, регистрации, хранения и отображения информации. Элементы системы различаются формой представления информации, быстродействием, конструкцией, логикой функционирования, что представляет существенные трудности при ее создании. Эта проблема решается с помощью интерфейсов. Использование микропроцессоров в забортом блоке расширяет функциональные возможности системы, упрощает процедуры градуировок, тестирования, контроля работоспособности и диагностирования.

Все это объясняет появление во всем мире универсальных измерительных устройств, которые могут быть использованы как в различных комбинациях, так и в виде зондирующих, буксируемых и автономных измерительных устройств, в которых состав аппаратного комплекса может меняться в зависимости от поставленной практической задачи.

В последнее время при разработке и создании измерительных систем широко используется модульный подход. Сконструированные типоразмеры датчиков, электронных схем вторичного преобразования, блоков передачи информации и средств регистрации позволяют использовать элементную и системную базу практически для любых измерительных устройств и систем. Кроме того, созданы датчики, позволяющие одновременно выполнять измере-

ния различных океанологических характеристик, что в значительной мере упрощает конструкцию аппаратуры. Так, например, в измерителях с двухплеченым датчиком одну из пленок можно подключить в канал измерения пульсаций температуры, а другую — в канал измерения пульсаций скорости потока. Трехэлементный датчик, имеющий центральный точечный и два пленочных электрода, позволяет производить одновременные измерения трех пульсационных характеристик в одной точке: электропроводность конвективным способом с помощью центрального электрода; температуру и скорость течения с помощью пленочных электродов. По-видимому, подобная технология создания комплексных датчиков довольно перспективна.

Анализ метрологических проблем океанологических измерений позволяет сделать следующие основные выводы. В настоящее время используется большое число разнообразных средств измерений океанологических характеристик для регистрации фоновых (стандартизованные средства измерений) и пульсационных составляющих (нестандартизованные средства измерений). Следует отметить, что точностные характеристики основных средств измерений, приведенные в литературе и паспортах приборов, носят, как правило, рекламный характер и определяют не погрешности измерения физических величин, а погрешности измерения этих величин без учета их динамических свойств, т. е. в статическом режиме. Погрешность измерения должна представлять собой суммарную погрешность, одной из составляющих которой будет методическая погрешность, зависящая от условий измерения, динамической характеристики средства измерений, изменчивости исследуемого параметра и особенностей решаемой задачи. В конечном итоге суммарная погрешность может на несколько порядков превышать инструментальную.

## 15.2. Зондирующие гидрологические системы

Приборы и устройства, предназначенные для исследования распределения по глубине одного или нескольких гидрофизических и гидрохимических параметров морской воды, обычно называют зондирующими гидрологическими системами.

Развитие океанологических исследований позволило выявить сложность процессов, протекающих в Мировом океане, что в свою очередь потребовало создания высокочувствительной и точной аппаратуры с полной автоматизацией измерений и обработки данных, с возможностью получения почти непрерывных вертикальных профилей распределения океанологических характеристик. Образцами такой аппаратуры стали СТД-системы (conductivity, temperature, depth), предназначенные для измерения электропроводимости, температуры и давления. Около 40 лет назад начались работы по созданию аппаратуры, измеряющей *in situ* океанологические характеристики. Одним из родоначальников этого направления в океанологи-

ческом приборостроении можно назвать Н. Л. Брауна, который уже в 1962 г. опубликовал результаты своих исследований по созданию индуктивного преобразователя для измерения электропроводимости морской воды *in situ*, а позднее разработки по созданию платинового термометра сопротивления; двойного моста, предназначенного для компенсации влияния температуры, и т. п.

Одной из первых в мире СТД-систем, позволяющих выполнять измерения *in situ* температуры, электропроводимости, гидростатического давления и скорости звука, можно назвать систему ASWEP8, разработанную в США в 1968 г. И уже за следующие 80 лет только в США было разработано более 1000 подобных приборов. Использование в океанологической практике первых появившихся СТД-систем дало возможность исследовать тонкую термохалинную структуру и сложную слоистую структуру вод Мирового океана. Дальнейшее развитие океанологических исследований потребовало проведения комплексных методов подробного изучения гидрофизических и гидрохимических полей океана. Поэтому позднее появились приборы, способные регистрировать и другие океанологические параметры (характеристики течений, скорость распространения звука, пульсационные характеристики и т. п.), но по традиции за ними все равно остается общепринятое название СТД-систем.

Всю аппаратуру подобного типа можно классифицировать по способу использования, а также по принципу построения измерительных схем и способу представления информации.

По способу использования, т. е. по возможности получения вертикальной стратификации океанологических характеристик, СТД-системы подразделяются на привязные и свободнопадающие. Привязные системы опускаются в воду с борта судна на кабель-тросе. В этом случае на результат измерений в погружаемом устройстве оказывают влияние качка, вибрации, дрейф судна и т. п., что создает значительный уровень помех.

Свободнопадающие системы, позволяющие проводить измерения на ходу судна, можно подразделить на теряемые системы с бесконтактной связью зондирующего устройства с бортовым блоком и автоматические автономные системы с внутренним накопителем информации. Такие зонды близки к идеальным, но их конструкция будет более сложной.

Промежуточное положение занимают квазисвободнопадающие и свободноскользящие системы. К первым в основном относятся теряемые, обрывные системы с проводной линией связи и спиннинговые. Достаточно высокая степень автономности таких систем обеспечивается малым диаметром и близким к единице удельным весом проводов линии связи, а также выбранным способом раскручивания провода. Однако здесь сказывается высокая стоимость единичного зондирования, вызванная высокой ценой теряемой аппаратуры, малоканальностью и заметной погрешностью определения глубины.

Правда, в настоящее время принцип квазисвободного падения с проводной линией связи стал использоваться и в более сложных

многоканальных СТД-системах (мини-зонд ОКБ ОТ РАН или СТД-система «Баклан» АО ИО РАН). Однако эти системы обладают определенными недостатками: измерения начинаются не с «нулевой» отметки глубины; они довольно громоздки и тяжелы (50—200 кг); сложны в обращении, что затрудняет проведение повторных зондирований.

В последнее время в океанологической практике стали использоваться так называемые СТД-системы многоканальные и «возвращаемые», с малыми массовыми и габаритными параметрами, занимающие промежуточное положение между обрывными и свободнопадающими (ближе к теряемым системам), использующие тонкий и легкий провод связи, разрывного усилия которого достаточно для поднятия устройства после зондирования на борт судна. Подобная аппаратура была разработана в МИФИ. Система имеет четыре измерительных канала: температуры, удельной электропроводности, давления и пульсаций скорости с выходом на компьютер. Зонд подобного типа использовался в 35-м рейсе НИС «Академик Курчатов» и обеспечил при скоростях зондирования до 1,5 м/с снятие профилей температуры с разрешением по глубине  $\pm 10$  см и чувствительность измерений температурных флуктуаций  $0,02^\circ\text{C}$ .

В свободноскользящих системах используется, как правило, индуктивная связь зондирующего устройства с бортовым блоком. Они характеризуются слабой механической связью с судном. Их недостатком является необходимость предварительной подготовки линии связи (троса или кабель-троса) и снижение степени автономности при наличии значительных подводных течений в районе исследований.

По второму типу классификации системы подразделяются на аналоговые и цифровые. В аналоговых измерительных системах сигнал на выходе из блока вторичного преобразования, представленный в виде напряжения, силы или частоты колебаний электрического тока, непрерывно передается на бортовой блок по линиям связи или регистрируется внутри самого измерителя. В цифровых измерительных системах исследуемый параметр преобразуется в зондирующем устройстве в цифровой вид и передается в бортовой блок зонда с определенной, заранее заданной, дискретностью по линии связи в виде последовательных двоичных или двоично-десятичных кодов. Подобные измерители позволяют производить квантование измеряемых характеристик по уровню и по времени.

При использовании зондирующей (а также буксируемой) аппаратуры метрологические характеристики получаемой информации существенно зависят не только от характеристик измерительной аппаратуры, но и от методов и условий производства измерений. Методика и условия проведения измерений оказывают весьма существенное влияние на методическую погрешность, которая зачастую значительно превышает инструментальную погрешность и не учитывается при обработке информации. Например, при выполнении зондирования или буксировки одной из основных составляющих методической погрешности является динамическая по-

грешность. Динамическая составляющая погрешности обусловлена динамической характеристикой измерительной аппаратуры (инерционностью), вертикальными или горизонтальными градиентами исследуемых параметров и скоростью зондирования (буксировки). Динамическая характеристика является характеристикой измерительной аппаратуры, скорость зондирования (буксировки) может регулироваться в процессе измерений, а характеристики вертикального (горизонтального) распределения являются предметом изучения.

Как показывает практика, истинное значение постоянной времени измерительных приборов при наблюдениях *in situ* обычно превышает значение, записанное в паспорте прибора для датчика, потому что инерционность всего прибора включает в себя постоянную времени датчика; инерционность регистрирующего механизма; инерцию, связанную с захватом воды оправой датчика и влиянием массы прибора. Так, постоянная времени датчика температуры СТД-системы 9006 фирмы «Биссет—Берман» рекламируется как 0,35 с, а ее фактическое значение оказывается даже более 1 с.

Проходя, например, через слой с резкими градиентами исследуемой характеристики, измерительное устройство регистрирует ее, как принято считать, через промежуток времени, равный  $3\tau$ . За это время измерительное устройство пройдет расстояние  $L = 3V\tau$ , где  $V$  — скорость зондирования или буксировки;  $\tau$  — постоянная времени датчика, которое является как бы разрешающей способностью данного прибора по расстоянию. Так, батитермограф Т-4 «Сиппикан» (США) на испытаниях при скорости зондирования 6 м/с показал разрешающую способность по вертикали 60 см, а с использованием тормозящего устройства — 10 см.

Кроме того, необходимо учитывать, что в настоящее время постоянная времени большинства современных датчиков имеет порядок 0,1 с, а разрешающая способность по расстоянию — 0,1 м. В этом случае значительное влияние начинают оказывать размеры датчиков. Особенно это сказывается на датчиках электропроводимости индуктивного типа, являющихся практически безынерционными, так как их размеры больше размеров термодатчиков. Поэтому разрешение по расстоянию датчиков электропроводимости практически определяется в основном их размерами.

В зависимости от поставленных задач выдвигаются различные требования к получаемой информации. Например, для изучения циркуляции вод Мирового океана в соответствии с программой WOGЕ необходимо измерять температуру с погрешностью  $0,002^\circ\text{C}$  и с чувствительностью  $0,0005^\circ\text{C}$ ; соленость — с погрешностью  $0,002\text{‰}$  и с чувствительностью  $0,001\text{‰}$ ; гидростатическое давление — с погрешностью 0,3 бар и с чувствительностью 0,1 бар. Поэтому для обоснования планирования измерений и правильной интерпретации их результатов при разработке методики проведения измерений необходимо иметь определенную физическую модель объекта исследований; которая может быть различной в зависимости от целей поставленной задачи. Использование СТД-систем, кроме того, по-

зволяет в реальном времени при производстве измерений одновременно определять распределение таких обобщенных параметров среды, как частота Вайселя—Брента, число Ричардсона, число Кокса, параметры активности турбулентности, предложенные Гибсоном, и др.

Рассмотрим более подробно некоторые наиболее широко используемые СТД-системы. К одной из первых свободнопадающих СТД-систем можно отнести автономный измерительный океанографический зонд SAMO фирмы «Казакрус», Франция, который предназначен для измерения температуры воды и скорости звука в воде до глубины 5000 м (рис. 15.1).

Кроме того, это зондирующее устройство может быть оснащено приборами для регистрации УЭП, концентрации растворенного кислорода, pH и т. п. Зонд не требует для своей эксплуатации лебедок. Он просто выбрасывается за борт и за счет собственного веса опускается до заданной глубины, где сбрасывает груз и после этого всплывает на поверхность. В процессе спуска и подъема со скоростью около 2 м/с зонд осуществляет измерения океанологических характеристик в виде цифровых данных параллельно с контрольным сигналом. Обнаружению зонда после всплытия способствуют радиосигналы, передаваемые прибором в течение 7 ч, проблесковый огонь в темное время суток, а также наличие уголкового отражателя.

Датчик температуры прибора расположен вне корпуса, а регистратор оснащен излучателем с частотами от 4 до 8000 Гц, оттарированным пропорционально температуре от  $-2$  до  $35^{\circ}\text{C}$  с точностью до  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Питание схемы канала температуры осуществляется от батарей напряжением  $\pm 15$  В. В качестве датчика давления в устройстве используется манометрический потенциометр, позволяющий производить измерения в диапазоне от 0 до 500 бар (0—5000 м) с точностью  $\pm 1\%$ , имеющий выходную частоту от 4 до 8000 Гц и рабочий диапазон температур от  $-2$  до  $35^{\circ}\text{C}$ . Напряжение питания датчика  $\pm 15$  В. Измерение скорости звука в воде производится в диапазоне от 1440 до 1660 м/с с выходной частотой от 7 до 8000 Гц и точностью  $\pm 1\%$ . Напряжение питания  $\pm 15$  В. Цифровое регистрирующее устройство позволяет выполнить 4000 измерений с частотой 1,25 с и с автономностью 90 мин. Сам корпус зонда имеет длину 2500 мм и диаметр 300 мм при массе 40 кг.

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (Санкт-Петербург) выполнена разработка телеметри-



Рис. 15.1. Автономный измерительный океанографический зонд SAMO.



ческого самолетного гидрозонда, предназначенного для измерения вертикального распределения температуры и УЭС морской воды в режиме свободного падения до глубины 500 м с передачей результатов измерений на борт низколетящего самолета. В СТД-системе в качестве датчика температуры используется ППТС с постоянной времени 0,1 с, работающий в диапазоне  $-2...20^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ ; датчика УЭП — миниатюрная трехэлектродная кондуктометрическая ячейка, работающая по солености в диапазоне 2—36 ‰ с погрешностью не более  $\pm 0,05\%$ ; датчика гидростатического давления — полупроводниковый тензорезистор, работающий в диапазоне 0—50 бар с разрешением по глубине не менее  $3\pm 5$  м. Аналоговые сигналы, получаемые с датчиков, с циклическостью 1 с преобразуются внутри зонда в частоту, а затем — во время-импульсный код, с последующей передачей по гидроакустическому каналу на плавающий на поверхности буй-регистратор. Получаемая информация на буйе преобразуется в УКВ-радиопосылки и передается на борт самолета.

СТД-система массой до 5 кг вместе с ретранслятором сбрасывается с самолета, летящего на высоте до 800 м. При достижении ими воды ретранслятор остается на поверхности, а сам зонд погружается со скоростью 2—3 м/с. Подобная конструкция обеспечивает уверенный прием информации от зонда на буй с глубин до 500 м и в дальнейшем на самолет, летящий со скоростью не более 360 км/ч, в пределах прямой видимости взаиморасположения ретранслятора и самолета.

В состав аппаратуры СТД-системы кроме теряемой части (зонд и ретранслятор) входят: расположенные на борту самолета УКВ-радиоприемник информации с блоком магнитной памяти для ее записи и адаптером прямой связи с компьютером в интерфейсе RS—232, а также контрольно-поверочный комплекс. С его помощью осуществляется контроль функционирования и уточнения градуировочных характеристик каждого экземпляра зонда непосредственно перед сбросом, которые автоматически заносятся в память бортового компьютера.

В ЦКБ ГМП разработана СТД-система с внутренней памятью «Челнок», предназначенная для работы в составе АБС или при зондировании до 1000 м. В состав системы входят: зондирующее устройство, высокоскоростная лебедка, согласующее устройство, зарядное устройство, персональный компьютер или принтер. Зондирующее устройство цилиндрической формы высотой 750 мм, с наибольшим диаметром 370 мм и массой (без груза) 8 кг позволяет измерять следующие характеристики:

- температуру воды в диапазоне  $-2...32^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ ;
- электропроводимость в диапазоне 2—7 См/м с погрешностью  $\pm 0,006$  См/м;
- гидростатическое давление до 100 бар с погрешностью  $\pm 0,3$  бар;
- постоянную времени датчика температуры воды менее 50 мс.

Объем внутренней памяти зонда — до 5000 измерений. Число зондирований без подзарядки аккумуляторов не менее 25. Диаметр несущего троса не менее 3—4 мм.

В качестве примера квазисвободнопадающего зонда можно привести созданный в Донецком университете автономный зонд многоцелевого использования с ненагруженной линией связи с бортом судна. Данная СТД-система предназначена для зондирования на глубинах до 1000 м при исследовании тонкой структуры и мелкомасштабной турбулентности. Зонд имеет герметичный цилиндрический корпус, в нижней части которого размещены балласт переменной массы и датчики, а в верхней — поплавков с внутренней полостью с закрепленной в ней бескаркасной бухтой капронового троса со свободным центральным сходом. Вторая катушка с капроновым тросом, смягчающая воздействие дрейфа и качки судна, устанавливается на борту. Поплавок обеспечивает плавучесть зонда, близкую к нулевой, что позволяет системе свободно и плавно погружаться при зондировании. Скорость погружения зонда устанавливается в диапазоне 0,8—1,2 м/с путем изменения балласта переменной массы. По окончании зондирования система с помощью специального подъемного устройства и капронового троса выбирается на борт судна. В случае погружения зонда ниже допустимой глубины балласт с помощью специального приспособления (оттарированного на предельную глубину погружения) обрасывается, и зонд, получив положительную плавучесть, всплывает на поверхность, оставаясь связанным с судном через капроновый трос.

В состав зондирующего устройства входят датчики средних значений температуры воды, УЭП, гидростатического давления, скорости звука; пульсационных значений температуры воды, УЭП, вертикального компонента пульсаций скорости течения; коммутатор каналов; аналого-цифровой преобразователь; микропроцессорная система управления и регистрации информации; устройство последовательного обмена; устройство управления функциональным контролем; блок питания — батарея аккумуляторов и преобразователь напряжения.

Для измерения средних значений температуры воды используется медный ПТС в прочной медной трубке, заполненной теплопроводной массой. Сопротивление датчика при температуре 20 °C составляет 1000 Ом. Напряжение, меняющееся на датчике, сравнивается с напряжением на эталонном сопротивлении, по которому проходит тот же ток (переменный с частотой 10 кГц), а затем усиливается до заданного уровня. Абсолютная погрешность измерения температуры не более 0,08 °C, чувствительность 0,009 °C в диапазоне температур -2...35 °C. Изменение гидростатического давления в диапазоне 0—100 бар не влияет на погрешность измерений средней температуры. Датчик пульсационных значений температуры, работающий в диапазоне 0,0015—1 °C с чувствительностью 0,00025 °C, отличается от датчика средних значений температуры только размерами (диаметр 0,35 мм).

В качестве датчика средних значений УЭП используется индуктивный с калиброванным внутренним отверстием тороидальных трансформаторов и высокостабильным источником питания (переменное напряжение с частотой 10 кГц). Измерение УЭП произ-

водится в диапазоне 1,5—6,5 См/м с основной погрешностью 0,1—0,15 % от измеряемой величины (среднеквадратическая погрешность 0,01 См/м); полоса пропускания при скорости набегающего потока 1 м/с составляет 0—7 Гц; дополнительные погрешности в диапазоне температур  $-2...35^{\circ}\text{C}$  и гидростатического давления 0—100 бар не превышают для каждого влияющего фактора 0,05 % от измеряемой величины.

Пульсационные значения УЭП измеряются с помощью трехэлектродной кондуктометрической ячейки, два электрода которой являются потенциальными, а один — токовым. Масштаб чувствительности объема датчика, расположенного перед его обтекателем, приблизительно равен его диаметру. Это обеспечивается определенной длиной электродов и расстоянием между внешними сторонами потенциальных электродов. Полоса пропускания датчика диаметром 7,5 мм при скорости набегающего потока 1 м/с составляет 0—60 Гц. Погрешность измерения в диапазоне 0,0005—0,1 См/м составляет 0,2—0,4 % от измеряемой величины.

Датчик гидростатического давления — серийный тензопреобразователь типа Д-16. Для осуществления термокомпенсации с тензометрического моста выделяется сигнал, пропорциональный изменению температуры, с его последующим нормированием и суммированием с выходным сигналом датчика. В рабочем диапазоне 0—100 бар датчик позволяет измерять гидростатическое давление с основной погрешностью 0,1 бар и чувствительностью 0,0025 бар при полосе пропускания 0—12 Гц и с дополнительной погрешностью в диапазоне температур  $-2...35^{\circ}\text{C}$  не более 0,05 бар.

Скорость распространения звука в приборе измеряется с помощью датчика импульсно-циклического типа с использованием баротермокомпенсации. Измерения производятся в диапазоне 1400—1650 м/с с основной погрешностью 0,2 м/с, чувствительностью 0,05 м/с при полосе пропускания со скоростью набегающего потока 1 м/с 0—20 Гц. Дополнительная погрешность не более 0,1 м/с от каждого фактора (температура и давление). Пульсации вертикального компонента скорости в диапазоне 0,5—150 мм/с измеряются с чувствительностью 0,35 мм/с.

Электронные схемы датчиков выполнены по модульному принципу, имеют одинаковые типоразмеры, электрические разъемы и устройства крепления. Блок питания в виде батарей аккумуляторов типа НКГК-Л и преобразователя напряжения позволяет получить напряжение  $\pm 15$  и  $\pm 5,6$  В. Емкости аккумуляторов хватает на 12 ч непрерывной работы. Бортовой блок СТД-системы работает на базе персонального компьютера.

В Морском гидрофизическом институте АН Украины была разработана *свободноскользящая СТД-система типа МГИ-8101К* (рис. 15.2), предназначенная для измерения температуры, УЭП, пульсаций УЭП морской воды и гидростатического давления с судна, лежащего в дрейфе, при свободном падении зондирующего устройства



Рис. 15.2. Свободноскользящая СТД-система типа МГИ-8101К.

ПУ-01К вдоль одножильного кабель-троса длиной не более 3000 м на глубину до 2000 м. Связь ПУ-01К с бортовым блоком осуществляется с помощью индуктора, питание ПУ-01К — от батарей аккумуляторов типа НКРК-ЗС-1142, позволяющей производить непрерывную работу без подзарядки в течение не более 4 ч.

Получаемая информация регистрируется на борту судна в форме, удобной для оперативного наблюдения измеренных параметров и последующей обработки на ЭВМ.

СТД-система МГИ-8101К состоит из зондирующего устройства ПУ-01К, бортового блока, блока питания и блока регистрации и вывода информации.

# Технические характеристики МГИ-8101К

## Температура

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| диапазон измерений, °C .....    | -1,5...33     |
| чувствительность, °C .....      | $\leq 0,0015$ |
| погрешность измерений, °C ..... | $\pm 0,005$   |
| постоянная времени, с .....     | 0,05          |

## УЭП

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| диапазон измерений, См/м          |               |
| 1-й поддиапазон .....             | 1,8—5,1       |
| 2-й поддиапазон .....             | 2,9—6,0       |
| чувствительность, См/м .....      | $< 0,00015$   |
| погрешность измерений, См/м ..... | $< \pm 0,005$ |

## Пульсации УЭП

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| диапазон измерений, См/м .....    | -0,01...0,01  |
| чувствительность, См/м .....      | $< 0,0001$    |
| погрешность измерений, См/м ..... | $< \pm 0,003$ |

## Гидростатическое давление

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| диапазон измерений, бар .....    | 0—200      |
| чувствительность, бар .....      | $< 0,0004$ |
| погрешность измерений, бар ..... | $< 0,05$   |

Время измерения параметров средних величин, с .....

Время измерения пульсационного параметра, с .....

## Зондирующее устройство

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| габаритные размеры, мм ..... | 364×214×360 |
| масса, кг .....              | 15          |

Первыми СТД-системами, разработанными у нас в стране, были привязные зонды «ИСТОК» (МГИ АН Украины), «АИСТ» (ИО РАН), «Зонд-батометр» (ЦКБ ГМП). Наибольшее распространение, особенно на судах Гидрометслужбы, нашли СТД-системы типа «Зонд-батометр», последующие модификации которого получили название «Гидрозонд». Системы были разработаны группой сотрудников ЦКБ ГМП (Обнинск) под руководством Н. М. Скурихина.

СТД-система «Гидрозонд» предназначена для измерения температуры, УЭП морской воды, гидростатического давления как в зондирующем варианте, так и при выдержке на отдельных горизонтах на глубинах до 6000 м, а также обеспечивает отбор проб морской воды на гидрохимический анализ с помощью специальной кассеты батометров.

Зондирующее устройство системы (рис.15.3) включает в себя датчики, измеритель с импульсным питанием, блоки питания и связи, кассету батометров. Конструктивно зондирующее устройство выполнено в виде блочной стойки, устанавливаемой в герметичном стальном корпусе, на нижнем фланце которого расположены датчики и гермовводы. В качестве датчика температуры используется стандартный платиновый термометр сопротивления типа ТСП-865-01, позволяющий производить измерения в диапазоне  $-2...35$  °C с погрешностью  $\pm 0,03$  °C и с постоянной времени 0,5 с. УЭП измеряется с помощью датчика индуктивного типа.

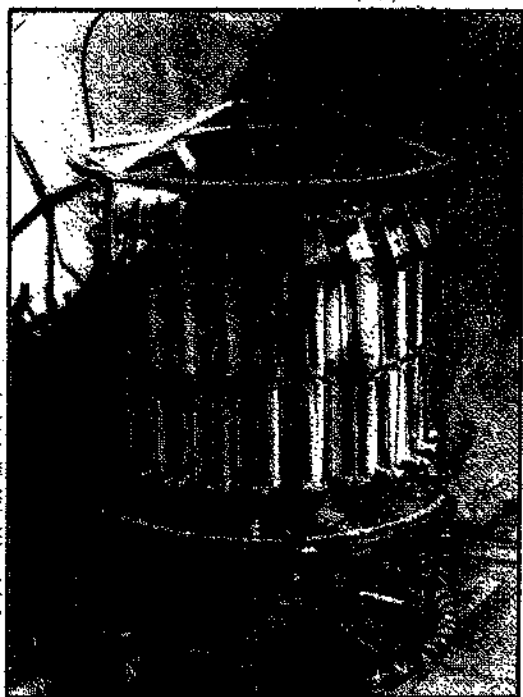


Рис. 15.8. СТД-система «Гидрозонд».

Измерения производятся в двух автоматически переключаемых поддиапазонах 0,5—3,5 и 3,5—6,5 См/м с погрешностью  $\pm 0,003$  См/м. Для устранения влияния внешнего гидростатического давления датчик электропроводимости помещен в герметичный металлический корпус и снабжен калиброванной трубкой из кварцевого стекла. Для исключения короткого замыкания витка морской воды, индуктивно связывающего сердечники тороидальных трансформаторов, поверхность защитного корпуса покрыта изолирующей краской, а сам датчик электрически разомкнут с помощью вставки из резинового уплотнения. Для измерения гидростатического давления предусмотрены три потенциометрических датчика давления типа ДТ, работающих в трех поддиапазонах: 0—38 бар с погрешностью  $\pm 0,4$  бар; 38—192 бар с погрешностью  $\pm 2$  бар; 192—600 бар с погрешностью  $\pm 6$  бар. Три датчика давления используются для получения более высокой точности и разрешающей способности на малых глубинах. Выбор и подключение соответствующего датчика давления осуществляются автоматически. При этом датчики давления для малых глубин имеют защиту от перегрузок, создаваемых давлением на больших глубинах.

Датчики температуры, УЭП и давления включены в соответствующие измерительные мосты, питание которых осуществляется импульсным напряжением. В качестве элемента уравнивания мостов используется резистивный 12-разрядный делитель типа R/2R, подключаемый поочередно к каждому мосту.

Связь зондирующего устройства с бортовым блоком осуществляется по одножильному кабель-тросу типа КГ1-53-90, имеющему разрывное усилие 53 кН, массу погонного метра 0,36 кг, диаметр 9,4 мм. По этому кабелю в бортовой блок из зонда поступает информация последовательным кодом, а в зондирующее устройство подается напряжение питания. Наличие внешнего питания позволяет выполнять активное термостатирование измерительных схем и тем самым исключать дополнительную температурную погрешность. Потребляемая зондирующим устройством мощность электрического тока — 200 Вт.

Зондирующее устройство имеет следующие габаритные размеры: диаметр с ограждением 600 мм, высота 730 мм и масса 63 кг. Кассета батометров с диаметром 740 мм и высотой 800 мм имеет массу 56 кг.

Для выполнения зондирования до 6000 м необходимо иметь кабель-трос длиной не менее 7000 м; кабельную лебедку, обеспечивающую размещение на ее барабане кабель-троса такой длины; крабалку и канифас-блок на 5000 кг. Диаметр канифас-блока для уменьшения износа кабель-троса должен быть не менее 400 мм.

*Прецизионный гидрологический зонд для океанологических исследований*, разработанный в ВНИИФТРИ, предназначен для измерения температуры, УЭП морской воды, скорости звука и гидростатического давления до 6000 м. Титановый корпус зондирующего устройства (масса около 50 кг) цилиндрической формы. Связь с бортовым блоком осуществляется с помощью кабель-троса.

В устройстве используется совмещенный датчик температуры и УЭП, вернее, совпадают рабочие объемы этих датчиков, составляющие около 1 см<sup>3</sup>. Один из электродов датчика УЭП выполнен в виде спирали диаметром 10 мм и длиной 15 мм из никелевого капилляра диаметром 1,5 мм. Спираль охватывает второй электрод, изготовленный в виде шарика из химически стойкого металла и установленный на торце диэлектрической трубки. Датчик температуры в виде изолированной медной проволоки диаметром 0,06 мм, сложенной в несколько раз для достижения значительного электрического сопротивления, натянута внутри капилляра электрода датчика УЭП. Внутренность капилляра заполнена специальной жидкостью с высокой теплопроводностью. Таким образом, электрическое поле замыкается внутри спирали и практически совпадает с измерительным объемом датчика температуры, что уменьшает динамические погрешности пары преобразователей. Подобное устройство позволяет измерять температуру воды в диапазоне -2...35 °С со средней квадратической ошибкой 0,0086 °С, а УЭП в диапазоне 1,5—6,5 См/м со средней квадратической ошибкой 0,00067 См/м.

В датчике гидростатического давления используется тензорезисторный мост КНС-типа («кремний на сапфире»), помещенный в специальный вакуумированный объем. Вакуумирование применено, во-первых, для защиты тензоэлементов моста от водного конденсата, разрушающего дополнительные дюралюминиевые балансные резисторы; а во-вторых — для исключения погрешности измерений, вы-

званной изменением температуры во внутреннем объеме модуля, заполненного воздухом. При давлении до 600 бар датчик обеспечивает погрешность измерения не более 0,05 % при пороге чувствительности 0,0005 % и быстродействия до 0,01 с.

В качестве датчика скорости звука используется ультразвуковой интерферометр постоянной базы (10 мм). При рабочем объеме около 1 см<sup>3</sup> оптимальная частота ультразвука 1,2 МГц, что соответствует 17-й гармонике интерферометра. Выходным параметром является либо частота, либо напряжение, пропорциональное ей. После оптимизации режимов работы измеритель может обеспечить в диапазоне изменений скорости звука 1440—1550 м/с порог чувствительности до 0,001 м/с с погрешностью не более 0,2 м/с с быстродействием около 0,03 с.

*Информационно-измерительная система фирмы «Нейл Браун» (США)* предназначена для измерения распределения по глубине температуры и удельной электропроводности морской воды, содержания растворенного кислорода, относительного содержания хлорофилла и отбора проб воды на заданных горизонтах. Система «Нейл Браун» состоит из:

- погружаемого устройства, на раме которого смонтированы STD-зонд MARK-IIIВ, кассета батометров «Розетт», флуориметр «Акватрака» для измерения относительного содержания хлорофилла и датчик касания дна;

- гидрологической кабельной лебедки модели 2047 с одножильным кабель-тросом «Рочестер» типа I-H-255 и кран-балки для вывода погружаемого устройства за борт;

- бортовой стойки (570×750×1750 мм) для размещения блока питания и стабилизатора, терминала с цифровой регистрацией исследуемых параметров, блока управления кассетой батометров, магнитофона для первичной записи информации, процессора для расчета солености и управления печатью, цифропечатающего устройства, двухточечного двухконтактного самописца, приемника датчика касания дна с индикатором тока в кабель-тросе;

- вычислительного комплекса на базе персонального компьютера, снабженного графическим дисплеем, клавиатурой, двойным дисководом для мини-дисков, графическим принтером и четырехцветным плоттером.

STD-зонд MARK-IIIВ (рис.15.4) был разработан Н. Брауном в Вудсхоллском океанографическом институте (США). Со времени своего первого экспедиционного использования зонд заслужил международное признание за надежность и точность. Эта система используется и в зондирующем (как правило), и в буксируе-

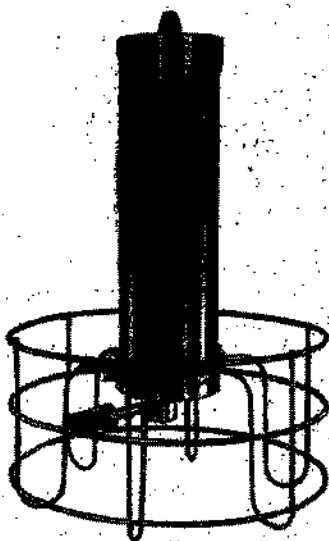


Рис. 15.4. STD-система MARK-IIIВ.



мом режимах. Обеспечение необходимых качества и количества измерений достигается здесь благодаря высокому коэффициенту усиления, точности и стабильности преобразователей и большому быстродействию. Использование обратного питания усилителей переменного тока уменьшает дрейф нуля и сильно уменьшает собственные шумы электрической цепи.

Прочный корпус погружаемого устройства из нержавеющей стали высотой 686 мм и диаметром 178 мм (с ограждением диаметром 508 мм) позволяет производить измерения до глубины 6500 м температуры и удельной электропроводности воды, гидростатического давления, содержания растворенного кислорода. В корпусе имеются дополнительные входы для подключения датчиков гидрооптических характеристик, правда, для этого требуется подсоединение в погружаемом блоке соответствующих интерфейсов, а в бортовом — дисплеев. Кроме того, в погружаемом корпусе помещены предварительные усилители сигналов, аналого-цифровой преобразователь и блок передачи данных.

Датчик температуры системы представляет собой комбинацию миниатюрного термистора ( $\tau = 30$  мс) и платинового ПТС ( $\tau = 250$  мс). Подобная комбинация позволяет в диапазоне температур  $-3...32^\circ\text{C}$  достичь точности измерений платинового ПТС ( $\pm 0,005^\circ\text{C}$ ) с разрешением  $\pm 0,0005^\circ\text{C}$  и быстродействия термистора. Датчик УЭП — 4-электродная миниатюрная ячейка ( $8 \times 80$  мм) из высокопрочного керамического алюминия с платиновыми электродами — позволяет производить измерения в диапазоне  $0-40\%$  с погрешностью  $\pm 0,005\%$  и с разрешением  $0,001\%$  при  $\tau = 30$  мс. Датчик гидростатического давления — тензометрический преобразователь с термокомпенсацией и минимальным гистерезисом — производит измерения в пяти поддиапазонах до глубины 6500 м с точностью до  $0,1\%$  и чувствительностью до  $0,0015\%$  от шкалы измерений при  $\tau = 30$  мс. Датчик содержания растворенного кислорода полярографического типа представляет собой электрохимическую ячейку с золотым катодом и хлорсеребряным анодом, помещенными в гелевый раствор KCl и отделенными от исследуемой среды тефлоновой мембраной толщиной  $12,7$  мкм. Для питания ячейки подается постоянное напряжение  $0,86$  В. Измерения производятся в диапазоне  $0-20$  мл/л с погрешностью  $\pm 0,2$  мл/л, чувствительностью  $\pm 0,05$  мл/л и с постоянной времени  $3$  с.

Три соответствующие схемы обеспечивают идентичные диапазоны выходных напряжений на аналого-цифровой преобразователь, выдающий информацию в 16-разрядном коде. Результаты измерений всех исследуемых характеристик последовательно проходят через аналого-цифровой преобразователь и перед передачей на борту судна откладываются в памяти. Получаемая в цифровом виде информация об исследуемых параметрах передается в телетайпном формате посредством частотно-импульсно-кодовой модуляции, рассчитанной на передачу 127 байтов за один цикл опроса.

СТД-система MARK-IIIВ была разработана еще в 70-е годы и с тех пор считается образцом аппаратуры подобного типа. В настоящее вре-

Таблица 15.3

Технические характеристики СТУД-систем

| Модель системы | Глубина, м | Температура, °C |                 | Электр. проводимость, См/ом |                 | Давление*, % |                 | Габаритные размеры, мм | Масса, кг | Дополнительные *<br>устройства и другие особенности** |
|----------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------------|-----------|-------------------------------------------------------|
|                |            | Точность        | Разре-<br>шение | Точность                    | Разре-<br>шение | Точность     | Разре-<br>шение |                        |           |                                                       |
| МКЭС/УОЗЕ      | 7 000      | 0,002           | 0,0005          | 0,002                       | 0,0010          | 0,014        | 0,0015          | Ø515×686               | 43,7      | 1, 2, 11, 12, 13, 14, 16, 20                          |
| JCTD           | 7 000      | 0,002           | 0,0001          | 0,008                       | 0,0010          | 0,025        | 0,0004          | Ø510×538               | —         | 1, 2, 11, 12, 13, 14, 17, 20, 21                      |
| 911 plus       | 10 500     | 0,002           | 0,0002          | 0,008                       | 0,0004          | 0,015        | 0,0010          | 805×330×952            | 29,4      | 1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 24              |
| 316 PROBE      | 7 000      | 0,003           | 0,0005          | 0,003                       | 0,0010          | 0,200        | 0,0300          | Ø100×990               | 14        | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 13, 14, 15, 20, 21           |

Примечание для таблиц 15.3—15.4. \*В процентах от полной шкалы выбранного диапазона.

\*\* 1 — датчик растворенного кислорода, 2 — датчик pH, 3 — датчик REDOX, 4 — датчик содержания меди, 5 — датчик содержания кальция, 6 — датчик содержания CO<sub>2</sub>, 7 — датчик содержания H<sub>2</sub>S, 8 — датчик содержания аммония, 9 — измеритель направления и скорости течения, 10 — измеритель скорости звука, 11 — альтиметр, 12 — флуориметр, 13 — прозрачный, 14 — измеритель обратного рассеяния света, 15 — измеритель освещенности, 16 — измеритель фотосинтетически активной радиации, 17 — измеритель поглощения хлорофилла, 18 — спектральный измеритель поглощения, 19 — индикатор дня, 20 — кассета батометров, 21 — внутренняя память, 22 — акустический канал связи, 23 — подключение системы GPS, 24 — портативная лебедка, 25 — дрейфующая самовсплывающая система, 26 — используется в составе буксирующей системы, 27 — индуктивный сканер информации.

мая появились новые образцы таких систем. В табл. 15.8 приведены технические характеристики наиболее известных СТД-систем нового поколения (по данным Д. Е. Левапнова, В. В. Сапожникова, А. И. Жаворонкова).

СТД-система *МКЗС/WOGE* была разработана еще под руководством Брауна, а затем усовершенствована фирмой «General Oceanics» (США). Благодаря своим техническим и эксплуатационным характеристикам эта система объявлена стандартной для исследований по программе *WOGE*.

Сравнительно новая, но уже завоевавшая признание *СТД-система JCTD* фирмы «Falmouth Scientific» (США) является дальнейшим развитием конструкции Н. Брауна и полностью совместима с зондом *MARK-III* (передача данных, питание, программное обеспечение). Ее основное отличие — использование датчика электропроводимости индуктивного типа, что должно улучшать, по-видимому, эксплуатационную надежность по сравнению с хрупкой кондуктометрической ячейкой. Усовершенствование СТД позволило значительно удешевить ее. Данная система также является стандартной для исследований по программе *WOGE*.

*СТД-система 911 plus* фирмы «Sea-Bird Electronics» (США) является модульной конструкцией с большим числом герморазъемов, с наличием насосной системы, что в определенной степени затрудняет ее эксплуатацию в экспедиционных условиях.

*СТД-система 316 PROBE* фирмы «IDRONAUT» (Италия) оснащена дополнительными датчиками для определения содержания меди, кальция и углекислого газа с постоянными времени 10, 3 и 30 с соответственно.

Все эти четыре СТД-системы могут работать с обычными батометрическими кассетами. По своим метрологическим характеристикам они в настоящее время являются своеобразным стандартом для океанологических исследований.

### Малогобаритные гидрологические зонды

В настоящее время в океанологической практике уделяется значительное внимание малогабаритной аппаратуре, которая не требует для своей установки специальных судовых помещений и которую можно легко использовать на малотоннажных судах. Подобную аппаратуру можно разделить на две категории: автоматизированные устройства, выполненные на базе микропроцессорной техники, и приборы с ручным управлением процессами измерений и регистрации получаемой информации. Рассмотрим устройство некоторых типов малогабаритных СТД-зондов.

В ЦКБ ГМП (группа Н. М. Скурихина) был разработан «Мини-зонд», предназначенный для измерения температуры, УЭП и гидростатического давления на глубинах до 200 м с борта маломерных судов без использования вспомогательного оборудования. В комплект СТД-системы входят: зонд гидрологический; блок обработки с

габаритными размерами 340×234×106 мм и массой 3,5 кг; батареи аккумуляторов с размерами 310×128×213 мм и массой 8,5 кг; ручная лебедка с кабелем (210 м) с размерами 698×495×300 мм и массой 10,5 кг; сетевой блок питания с размерами 395×225×135 мм и массой 5,8 кг.

Зондирующее устройство массой 8,5 кг помещено в цилиндрический корпус, изготовленный из нержавеющей стали, диаметром 169 мм и высотой 525 мм. Датчик температуры — платиновый ПТС — позволяет измерять температуру в диапазоне  $-2...35^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  и чувствительностью  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Датчик УЭП индуктивного типа производит измерения в диапазоне  $0,1—6,5\text{ См/м}$  с погрешностью  $0,007\text{ См/м}$  и чувствительностью  $0,001\text{ См/м}$ . Гидростатическое давление измеряется потенциометрическим датчиком типа ДТ в диапазоне  $0—20\text{ бар}$  с погрешностью  $0,1\text{ бар}$  и чувствительностью  $0,01\text{ бар}$ .

Конструкция системы позволяет хранить получаемую информацию в буферной памяти прибора при отключении электропитания с возможностью передачи ее на компьютер. Информация выводится также на цифровые индикаторы в единицах физических величин в процессе измерения. Электропитание системы осуществляется или от сети (220 В, 50 Гц) или от аккумуляторов (24 В). Питание от аккумуляторов обеспечивает 24 ч непрерывной работы.

Миниатюрная гидрохимическая СТД-система «Цикада», разработанная в ИО РАН, предназначена для измерения температуры, УЭП, содержания растворенного кислорода и гидростатического давления до глубины 150 м. В состав системы входят: зондирующее устройство, бортовой преобразователь данных (БПД), магнитофон (МГ), самописец типа Н-306 (Рег.) и цифровые индикаторы (ЦИ). Блок-схема системы представлена на рис. 15.5.

В зондирующем устройстве диаметром 80 мм, высотой 400 мм и массой 4 кг размещены датчики, электронные схемы и блок питания (набор батарей), обеспечивающий напряжение 6 В. Датчик температуры (Т) — платиновый ПТС типа ТСП-365 — позволяет проводить измерения в диапазоне  $0—40^{\circ}\text{C}$  при точности  $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$  с постоянной времени 0,5 с. Датчик УЭП (S) индуктивного типа измеряет в диапазоне  $0,2—5,0\text{ См/м}$  с точностью  $\pm 0,01\text{ См/м}$ . Датчик гидростатического давления (Р) типа ДТМ-1,5 позволяет измерять глубину по-

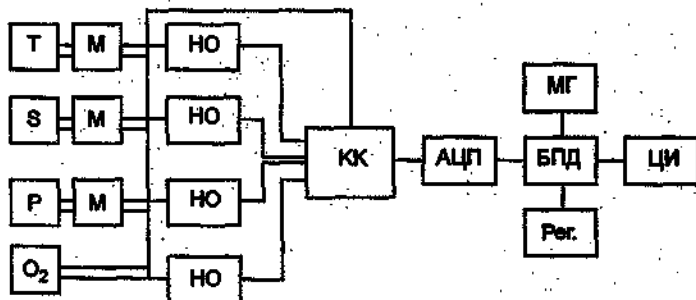


Рис. 15.5. Блок-схема СТД-системы «Цикада». Усл. обозначения см. текст.

гружения до 150 м с точностью  $\pm 2$  м. Датчик растворенного кислорода ( $O_2$ ) гальванического типа работает в диапазоне 0—10 мл/л с точностью  $\pm 0,8$  мл/л и имеет постоянную времени 5 с.

На мостовые схемы (М) для измерения температуры и давления подаются импульсы прямоугольной формы длительностью 80 мкс и с частотой следования 124 Гц, что позволяет повысить разрешающую способность аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На датчик УЭП для уменьшения реактивной составляющей подается синусоидальное напряжение частотой 8 кГц. Импульсный способ используется в целях экономии питания не только мостовых, но и аналоговых схем. Импульс подается только на время записи сигнала из нуля-органа (НО) в регистр.

Сигналы разбаланса мостовых схем и датчика кислорода поступают на входы нуля-органов и через коммутатор каналов (КК) поочередно подключаются к АЦП, который уравнивает мостовые схемы и преобразует аналоговые сигналы в последовательный двоичный код с частотным заполнением. Связь зондирующего устройства с бортовым блоком осуществляется с помощью одножильного кабель-троса.

Большое число мини-зондов выпускается и различными зарубежными фирмами. Технические характеристики некоторых мини-СТД-систем, разработанных в последнее время, приведены в табл. 15.4.

Среди мини-СТД-систем можно отметить MICRO STD2 фирмы «Falmouth Scientific» (США); в качестве линии связи между зондирующим устройством и бортовым блоком используется кабель-трос, и в нем не предусмотрено подключение дополнительных датчиков. Система MICRO STD3 снабжена внутренней памятью, имеет несколько большие размеры и приспособления для подключения дополнительных датчиков. Эти системы, а также AQUALINK и Chemitraka фирмы «Chelsea Instrument Ltd» (Великобритания) и SBE19 (SEASAT) фирмы «Sea-Bird Electronics» (США) по своим метрологическим характеристикам близки к стандартным системам.

Некоторые мини-СТД-системы имеют интересные конструктивные особенности. Система 801 PROBE может работать с компактным вариантом кассеты батометров. Система СТД/84 фирмы «Interocean» (США), выполненная в сферическом прочном корпусе из стеклопластика, может использоваться и для работы на АБС на глубинах до 1000 м. Система SMP-PROBE фирмы «ADM-Electronic GmbH» (Германия) снабжена датчиком сероводорода и специальной мешалкой для всех химических датчиков.

Система EMP-200 фирмы «APPLIED MICROSYSTEMS LTD» (Канада) отличается отсутствием бортового блока — зондирующее устройство напрямую подключается к последовательному порту любого компьютера, работающего в среде MSDOS. Система AQUA-16 фирмы «AQUA-MATIS» (Дания) имеет большое число встроенных датчиков, наиболее интересным из которых является микроэлектродный датчик растворенного кислорода с постоянной времени около 0,1 с.

Таблица 16.4

Технические характеристики некоторых мини-СТД-систем

| Модель системы | Глубина, м | Электропроводность, См/см |            | Температура, °C |            | Давление, % |            | Габаритные размеры, мм | Масса, кг | Дополнительные устройства - и другие особенности** |
|----------------|------------|---------------------------|------------|-----------------|------------|-------------|------------|------------------------|-----------|----------------------------------------------------|
|                |            | Точность                  | Разрешение | Точность        | Разрешение | Точность    | Разрешение |                        |           |                                                    |
| MICRO CTD2     | 7 000      | 0,005                     | 0,0001     | 0,005           | 0,0001     | 0,10        | 0,0100     | Ø51×350                |           | 1, 2, 12, 13, 15, 21                               |
| MICRO CTD3     | 7 000      | 0,005                     | 0,0001     | 0,005           | 0,0001     | 0,10        | 0,0100     | Ø83×400                | 4,5       | 21                                                 |
| AQUALINK       | 6 000      | 0,005                     | 0,0010     | 0,008           | 0,0005     | 0,10        | 0,0015     | Ø210×360               |           | 1, 2, 3, 21                                        |
| Chemtraka      | 6 000      | 0,010                     | 0,0010     | 0,008           | 0,0005     | 0,2 м       | 0,01 м     | Ø100×560               | 6,5       | 1, 2, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 23, 24           |
| SBE19          | 10 500     | 0,010                     | 0,0010     | 0,010           | 0,0016     | 0,25        | 0,0150     | Ø279×782               | 10,9      | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 15, 20                   |
| 301 PROBE      | 1 500      | 0,020                     | 0,0040     | 0,010           | 0,0040     | 0,25        | 0,1 дбар   | Ø75×685                | 4,0       | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 21                               |
| 302 PROBE      | 1 500      | 0,020                     | 0,0040     | 0,020           | 0,0040     | 0,25        | 0,1 дбар   | Ø50×600                | 2,2       | 9, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 24                      |
| 600 ME3        | 1 500      | 0,050                     | 0,0030     | 0,020           | 0,0020     | 0,50        | 0,1000     | Ø76×1080               | 15        | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 15, 20                   |
| CTD/S4         | 1 000      | 0,020                     | 0,0050     | 0,020           | 0,0080     | 0,15        | 0,04 дбар  | Ø250 (сфера)           | 11,0      | 1, 2, 8, 10, 13, 21                                |
| RCM 9          | 500        | 0,030                     | 0,0010     | 0,025           | 0,0010     | 0,25        | 0,01 дбар  | Ø90×500                | 4,0       | 1, 2, 8, 7, 10, 12, 13, 15, 21                     |
| SMP-PROBE      | 2 000      | 0,10 %*                   | 0,2 %*     | 0,050           | 0,1 %*     | 0,10        | 0,0200     | Ø128×513               | 17,0      | 9, 14, 21, 22                                      |
| EMP-200        | 300        | 0,10                      | 0,0030     | 0,050           | 0,0010     | 1,0 м       | 0,1 м      | Ø165×965               | 12,5      | 1, 2, 8, 9, 13, 15, 21, 24                         |
| AQUA-16        | 200        | 0,04                      | 0,0020     | 0,020           | 0,0100     | 0,25        | 0,02 дбар  | Ø130×707               | 9,0       | 1, 2, 3, 9, 10, 12, 13, 15, 19, 21, 24             |
| Data Sonde 3   | 200        | 1,00 %*                   | 0,0100     | 0,150           | 0,0100     | 0,5 м       | 0,1 м      | Ø89×622                | 4,2       | 1, 2, 8, 8, 13, 21                                 |

### 15.3. Буксируемые гидрологические комплексы

При исследовании Мирового океана большое значение имеет информация о пространственном изменении океанологических характеристик на поверхности и нижележащих горизонтах. В этом случае использование только зондирующих комплексов не может дать полной картины. Кроме того, всегда желательно получать информацию на борту движущегося судна без лишних затрат времени, в частности, необходимых при выполнении зондирования, когда неизбежна остановка судна. Тем более, что для получения удовлетворительной информации о вертикальном и горизонтальном распределении исследуемых параметров подобные остановки судна приходится делать довольно часто. Эффективным способом оперативного получения данной информации является использование различных измерительных устройств, буксируемых за непрерывно движущимся судном.

По способу буксировки и конструкции буксируемые измерительные системы можно разделить на следующие типы: 1) гирлянда датчиков, закрепленных на тросе или кабель-тросе, которую буксируют за судном при заданном заглублении; 2) датчики располагаются на буксируемом неуправляемом носителе; 3) датчики располагаются на буксируемом управляемом носителе, глубина хода которого может быть постоянной или меняться во времени. Информация с буксируемых измерителей обычно передается на борт судна по кабелю или гидроакустическому каналу, а в некоторых случаях накапливается и на самих носителях.

В океанологической практике гирлянды датчиков позволяют измерять в основном температуру воды в верхнем слое до глубин 300—400 м. Преимущество буксируемых неуправляемых носителей состоит в том, что датчики можно удалить от судна и в какой-то мере заглубить их во избежание влияния физических полей судна и волнения. Глубина заглубления подобной системы в известной степени зависит от скорости буксировки и длины вытравленного троса (кабель-троса). Буксируемые управляемые носители проводят измерения по заранее заданной или корректируемой наблюдателем траектории движения устройства примерно до глубины 500 м при скорости буксировки до 13 узлов и более.

Особые требования в буксируемых системах предъявляются к носителям аппаратуры; к системам заглубления и удержания устройств на заданном горизонте; к опуско-подъемным палубным механизмам. В настоящее время в океанологической практике при использовании буксируемых систем применяются два принципиально различных типа носителей: кабель с присоединенными к нему датчиками и контейнер с измерительной аппаратурой.

Для обеспечения заданного горизонта наблюдений или перемещения устройства по заданной траектории в буксируемых контейнерах углубителем чаще всего является сам носитель, корпус которого снабжается управляемыми или неуправляемыми стабилизирую-

щими рулями, а на конце буксирной линии подвешивают специальный углубитель, например в виде груза, углубляющей репелетки или «планера».

При использовании буксирной линии особое внимание следует обращать на процесс травления, выборки и намотки на барабан лебедки, когда возможно повреждение корпусов датчиков. Буксируемые контейнеры предназначены для размещения в них комплекса датчиков и других узлов измерительной аппаратуры. Они, как правило, буксируются на значительной скорости, что вызывает необходимость использования формы самих контейнеров с минимально возможным лобовым гидродинамическим сопротивлением для устранения влияния гидродинамических помех на показания датчиков. Это условие особенно важно при исследовании тонкой структуры гидрофизических параметров. Примером подобных контейнеров с практически ламинарным обтеканием может служить экспериментальная конструкция Лаборатории ВМС США, имеющая форму падающей капли и снабженная удлинненным трубчатым хвостовиком и стабилизаторами.

Измерительная аппаратура буксируемых систем в значительной степени подобна аппаратуре, используемой в зондирующих СТД-системах, т. е. она состоит из датчиков, телеметрической связи и блока регистрации данных. Правда, при использовании буксируемых гирлянд, когда измерения производятся одновременно 20—30 датчиками, возникают определенные трудности в разработке систем опроса датчиков и одновременной регистрации получаемой информации.

Измерение гидрофизических параметров и их передача могут выполняться непрерывно или дискретно. При дискретных наблюдениях интервалы между измерениями или частота опроса выбираются с учетом пространственно-временной изменчивости исследуемых характеристик. И при дискретных, и при непрерывных измерениях возможны значительные ошибки за счет постоянной времени прибора. Эта ошибка  $dt$  прямо пропорциональна пространственному градиенту измеряемого параметра, скорости судна  $V_0$  и постоянной времени прибора  $\tau_0$ .

$$dt = -(dt/dl)V_0\tau_0,$$

где  $dt/dl$  — пространственный градиент измеряемого параметра.

При использовании для измерения температуры двух датчиков с различными  $\tau$  приближенно восстановить истинное значение измеряемой величины можно с помощью выражения

$$t_{ис} = (t_2\tau_{01} - t_1\tau_{02})/(\tau_{01} - \tau_{02}),$$

где  $t_{ис}$  — истинное значение;  $t_1$  — показания прибора с постоянной времени  $\tau_{01}$ ;  $t_2$  — показания прибора с постоянной времени  $\tau_{02}$ . При выполнении практических расчетов с помощью данного выражения необходимо также учитывать факторы, связанные с конструктивными особенностями датчиков. Погрешности, вызванные дискретизацией, постоянной времени, ошибками определения координат судна, зависят от используемой аппаратуры и методики измерений. Они



могут быть сведены к минимуму или учтены при обработке результатов наблюдений.

В настоящее время в океанологической практике используется много разновидностей буксируемых систем: начиная от простейших измерителей ТПО на ходу судна и кончая сложнейшими комплексными аппаратами, которые не только выполняют измерения океанологических параметров в процессе движения судна, но и одновременно, отбирая пробы воды, подают их по специальным трубчатым кабель-буксирам на борт судна для производства гидрохимических анализов. Рассмотрим наиболее характерные из этих устройств.

Несколько принципиально сходных буксируемых устройств типа гирлянд были предложены в США и использовались при исследовании термической структуры океана. Общим для подобных устройств является носитель датчиков в виде прочной металлической цепи с обтекаемыми звеньями, сквозь которую проходит многожильный кабель с подключенными к нему термисторами. На конце цепи крепится обтекаемый груз и датчик давления для регистрации заглубления конца цепи. Подъемно-спусковое устройство — мощная специальная лебедка.

Наиболее «старой» конструкцией, послужившей основой для последующих модификаций, является *термисторная цепь Ричардсона и Хаббарта*, изготовленная фирмой «Commercial Engineering Company» (США). Датчики температуры в виде 23 термисторов, размещенных через 7,5 м, с постоянной времени 20 с и чувствительностью 0,01 °C позволяют измерять температуру воды в диапазоне -2...82 °C; они вмонтированы в кабель в резиновом шланге. При длине цепи 180 м и скорости буксировки 18 узлов измерения осуществляются до глубины 120 м; при длине 300 м и скорости 10 узлов — до 240 м. На конце цепи размещен датчик давления и гидродинамический углубитель массой 800—1500 кг. Сигналы с датчика последовательно поступают в бортовое регистрирующее устройство, в котором происходит линейная интерполяция результатов измерений. На ленте самописца вычерчиваются изотермы через 0,1 и 0,05 °C, а при необходимости и через 1 °C.

Одна из первых систем подобного типа у нас в стране была разработана в Калининградском (Атлантическом) отделении (филиале) ИО РАН: *буксируемая гирлянда термисторов* для наблюдений в деятельном слое моря на 10 горизонтах одновременно. Система состоит из 12-жильного кабеля, в который через каждые 10 м вмонтированы датчики температуры. На конце кабеля помещается датчик глубины ЭДЦ-10. Измерительная схема каждого канала представляет собой четырехплечный мост постоянного тока. В качестве регистратора используется электронный потенциометр ЭПП-09 со специальным устройством последовательного опроса каналов, выполненным на шаговом искателе.

*Комплекс измерительный буксируемый «Компас»* предназначен для измерения температуры, УЭП морской воды и гидростатического давления на ходу судна до глубины 300 м на 16 горизонтах. Управление работой комплекса, первичная обработка инфор-

мации и вывод ее на долговременный носитель осуществляются микроЭВМ. Источником информации о параметрах морской воды являются измерительные контейнеры. Каждый контейнер имеет автономное питание, содержит устройство измерения и преобразования информации и позволяет измерять один из параметров: температуру, УЭП или давление. В качестве датчиков используются: платиновый ПТС типа ТСП-365-01, датчик УЭП индуктивного типа, датчик давления тензOMETрического типа ДТ-54. Забортный блок включает в себя: измерительные контейнеры температуры (до 16 шт.), УЭП (до 8 шт.), давления (до 3 шт.), кабель-трос КГЗ-60 длиной 2500 м, углубитель.

#### Технические характеристики комплекса

|                                                 |               |
|-------------------------------------------------|---------------|
| Число горизонтов при измерении параметров ..... | До 16         |
| Канал температуры                               |               |
| диапазон измерения, °C .....                    | 0—30          |
| погрешность измерения, °C .....                 | ±0,1          |
| Канал УЭП                                       |               |
| диапазон измерения, См/м .....                  | 2,5—6,2       |
| погрешность измерения, См/м .....               | ±0,012        |
| Канал давления                                  |               |
| диапазон измерения, бар .....                   | 0,5—30        |
| погрешность измерения, бар .....                | ±0,5          |
| Дискретность измерения параметров, мин .....    | 0,5; 1; 5; 10 |

В качестве источников питания в контейнерах используются аккумуляторы типа ЦНК-0,94, емкость которых обеспечивает работу измерительного контейнера при минимальной дискретности измерений в течение не менее 80 ч. В комплексе предусмотрен индуктивный канал связи между бортовым блоком и измерительными контейнерами по одножильному кабель-тросу. Глубина погружения буксируемой линии определяется скоростью буксировки и длиной вытравленного троса. Так, при скорости судна 8—10 узлов и длине троса за бортом 2500 м глубина погружения концевой датчика составляет 300 м. Масса измерительных контейнеров составляет до 5 кг.

При проведении измерений кабель-трос с закрепленным на конце пассивным углубителем и контейнерами выводится за борт. Для определения заглубления буксирной линии на конце кабель-троса устанавливается измерительный контейнер давления, остальные контейнеры располагаются по всей длине кабеля в любой последовательности, выбираемой в зависимости от условий эксперимента. По управляющим сигналам из бортового блока производится одновременное измерение гидрологических параметров на всех горизонтах и последовательная передача информации по индуктивному каналу связи. Далее информация преобразуется в физические величины и регистрируется. Горизонты расположения измерительных контейнеров в процессе буксировки определяются расчетным путем по показаниям датчиков давления.

Непрерывные разрезы по температуре и солености на ходу судна на глубинах до 500 м в реальном масштабе времени позволяет по-

лучить буксируемая гирлянда мини-зондов CFD-fin фирмы «ADM-Electronic GmbH», выполненных в виде тросовых обтекателей. Вся гирлянда содержит 25 таких зондов, прикрепленных к одножильному кабель-тросу через 10—20 м. Последовательный съем информации и подача питания производится индуктивным бесконтактным способом. Максимальная глубина погружения 500 м.

#### Технические характеристики системы

##### Канал температуры

погрешность измерений, °C .....  $\pm 0,01$

чувствительность, °C .....  $\pm 0,001$

##### Канал УЭП

погрешность измерений, мСм/см .....  $\pm 0,01$

чувствительность, мСм/см .....  $\pm 0,001$

##### Канал давления

погрешность измерений, % от шкалы .....  $\pm 0,1$

чувствительность, % от шкалы .....  $\pm 0,002$

В МГИ АН Украины в разные годы были разработаны буксируемые носители (БН) «Нырок-2», «Галс», «Галс-2», а в Институте биологии южных морей АН Украины — БН «Кальмар». Их характеристики (по данным В. Н. Гайского) приведены в табл. 15.5.

БН «Галс» и «Галс-2» однотипны. Основное их различие заключается в конструкции горизонтального руля. «Галс-2» имеет несущую поверхность с крылообразным симметричным профилем с высокими гидродинамическими характеристиками. Несущие поверхности имеют закрылки, позволяющие изменять в зависимости от угла установки подъемную и заглубляющую силу при неизменном угле атаки основного профиля. Управление по глубине производится рулями, представляющими собой горизонтальную, сбалансированную по моменту относительно оси вращения пластину с обтекаемым профилем. Для обеспечения боковой устойчивости на этом руле уста-

Таблица 15.5

#### Технические характеристики буксируемых носителей

| БН      | Габариты, мм  | Масса на воздухе, кг | Расчетная глубина погружения, м | Расчетная скорость буксировки, узлы | Диапазон глубин (м) при скорости |          | Автономность, сут |
|---------|---------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------|-------------------|
|         |               |                      |                                 |                                     | 6 узлов                          | 12 узлов |                   |
| Нырок-2 | 2140×695×500  | 150                  | 1500                            | 16                                  | 120                              | 80       | 20                |
| Галс    | 1988×1808×538 | 96                   | 1000                            | 12                                  | 60                               | —        | 10                |
| Галс-2  | 2050×1260×500 | 96                   | 1000                            | 12                                  | 50—250                           | 0—100    | 10                |
| Кальмар | 1980×1840×370 | 70                   | 500                             | 12                                  | 200                              | 90       | 10                |

#### Чувствительность измерительных каналов БН

| Измеряемые параметры среды      | Нырок-2 | Галс   | Галс-2 | Кальмар |
|---------------------------------|---------|--------|--------|---------|
| Температура, °C (−2...35)       | 0,008   | 0,015  | 0,008  | 0,01    |
| УЭП, отн. ед. (40—47)           | 0,007   | —      | —      | 0,02    |
| Глубина, % (0—2000 м)           | 2,000   | —      | 0,010  | 2,00    |
| Скорость звука, м/с (1410—1530) | —       | 0,015  | 0,010  | 0,01    |
| Высочайшее, Гц                  | 5,000   | 80,000 | 3—12,5 | 3—25    |

новлен киль. Рычажная система позволяет изменять положение руля в диапазоне углов  $\pm 45^\circ$ . Управление положением горизонтального руля осуществляется электродвигателем, на который с борта судна по кабель-тросу подаются разнополярные импульсы напряжения регулируемой длительности (2—10 с).

БН «Кальмар» — несущий моноплан. Хвостовое оперение в виде двух плоских килей и прямоугольного поворотного стабилизатора, расположенного между ними. В контейнерах БН установлены электронные блоки измерительного комплекса и привод механизма поворота горизонтального руля. Через торцевые крышки контейнеров, на которых установлены датчики с ограждением и обтекателями, вводится кабель-трос. Точка подвески БН может перемещаться вдоль буксирной планки, чем достигается необходимая балансировка аппарата.

Широкое распространение получили системы, буксируемые по синусоидальной траектории. Периодически всплывая к поверхности и погружаясь до максимальных глубин 100—400 м, подобные комплексы позволяют получать по ходу судна практически непрерывные разрезы по соответствующим параметрам. При этом на буксируемые системы можно устанавливать не только обычные СТД-системы с комплектом дополнительных датчиков, но и другую аппаратуру, например планктон-регистраторы или электронные счетчики планктона.

Буксируемая система «Фатом океанолоджи Лимитед» (Канада) предназначена для проведения измерений гидрофизических параметров и отбора проб воды в толще воды на ходу судна. В последнее время в океанологическую практику все больше начинают входить системы сбора и обработки данных для непрерывного взятия проб воды с целью постоянного определения ее гидрохимических характеристик. Пробы воды отбираются с заранее заданных горизонтов или в специальные контейнеры, или непосредственно подаются на борт судна.

Данная система состоит из подводного носителя аппаратуры, кабель-буксира с обтекателями, специального грузоподъемного механизма и бортового комплекса аппаратуры (рис. 15.6).

Буксируемый носитель аппаратуры с небольшим лобовым гидродинамическим сопротивлением и рулями глубины вмещает в себя измерительный комплекс, например СТД-зонд MARK-IIIВ фирмы «Нейл Браун» (1—7), кабельный ограничитель и помпу (8) для закачки проб воды на борт судна с производительностью до 40 л/мин. Этот комплекс позволяет производить измерения и водозабор проб на ходу судна при скорости до 12 узлов. Увеличение скорости ограничивается динамическими характеристика-

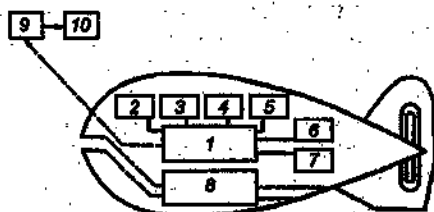


Рис. 15.6. Блок-схема системы «Фатом океанолоджи Лимитед».

Усл. обозначения см. текст.

ми СТД-зонда и производительностью помпы, на работе которой сказывается гидродинамическое сопротивление шлангового канала, предназначенного для подачи проб воды на борт судна.

Кабель-буксир с токопроводящими жилами для подачи по ним команд на буксируемый носитель и передачи от него измерительной информации имеет внутри себя шланговый канал с внутренним диаметром 8 мм, изготовленный из тефлоновой трубки. Грузоподъемное устройство включает в себя кабельную лебедку, позволяющую наматывать на нее кабель-буксир вместе с надетыми на него обтекателями.

Бортовой комплекс аппаратуры состоит из устройств (10), обеспечивающих представление в необходимом виде измерительной информации, получаемой с СТД-зонда; блока управления помпой и подачи проб воды с заданного горизонта на борт судна и пульта управления лебедкой и носителем (9).

Буксируемая система с программным обеспечением «Бетфиш» — серия 6800» разработана в Бедфордском океанографическом институте (Канада) и изготавливается фирмой «Guildline Instruments» (рис. 15.7).

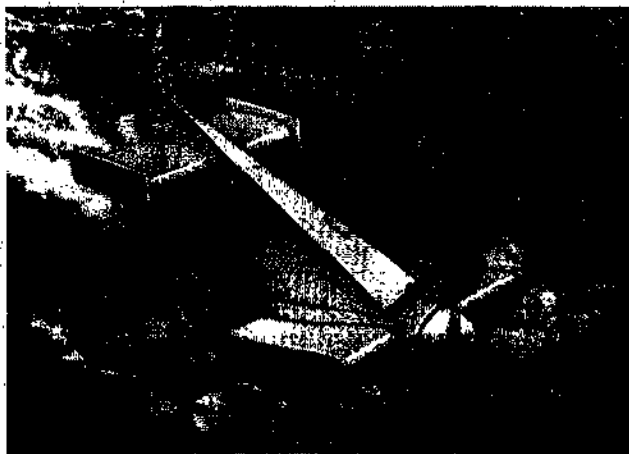


Рис. 15.7. Буксируемая система «Бетфиш».

«Бетфиш» — многофункциональная система, предназначенная для быстрого сбора океанологической информации, — буксируется на 7-жильном кабель-тросе диаметром 7,6 мм с прочностью на разрыв 8 т. Система снабжена гидравлическими рулями глубины, управляемыми в ручном или автоматическом режиме с буксирующего судна, что обеспечивает перемещение носителя во время буксировки по синусоидальной кривой в вертикальной плоскости или нахождение на постоянной глубине. Корпус носителя длиной 1860 мм, высотой 940 мм, шириной, включая рули глубины, 900 мм и массой на воздухе 68 кг изготовлен из стекловолокна, нержавеющей стали и алюминия. Максимальная глубина погружения носителя при скорости 14 узлов — 400 м, для чего необходимо использовать всего 600 м облегченного кабеля. Для использования в мелководных районах

устройство снабжено системой глубинного контроля, электрическая цепь которой связана с эхолотом буксирующего судна.

В нижней части носителя в канале прямоугольного сечения размещается СТД-зонд модели 8100 фирмы «Guildline Instruments» (Канада). Датчик температуры зонда — медный преволочный термометр сопротивления, работающий в диапазоне  $-2...35^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ , стабильность датчика  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , линейность  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$  в пределах измеряемых температур  $0-20^{\circ}\text{C}$ . Датчик УЭП — четыре электрода в виде колец из нержавеющей стали на трубке из пирекса длиной 200 мм. Точность показаний датчика  $\pm 0,04\%$ . Датчик давления — мембранный тензодатчик с точностью  $\pm 0,2\%$  по шкале. Кроме того, в носителе установлены флуориметр для исследований цвета и измерители прозрачности и количества хлорофилла. Электропитание системы осуществляется от судовой сети 110 В, 60 Гц, потребляемая мощность 1 кВт. Информация с датчиков в аналоговой или дискретной форме со скоростью 5 измерений в секунду по 3 параметра передается в бортовое вычислительное устройство, записывается на магнитную ленту и воспроизводится на дисплее. Экспериментальная буксировка систем со скоростью 18 узлов показала, что среднеквадратическая ошибка составила по температуре  $0,01^{\circ}\text{C}$ , по солености —  $0,014\%$ , по плотности —  $0,011\text{ кг/м}^3$ .

В последнее время появилось много новых типов буксируемых систем. Технические характеристики некоторых из них приведены в табл. 15.6 (по данным Д. Е. Левашова, В. В. Сапожникова, А. И. Жаворонкова). В них уже учитывалось, что максимальные глубины погружения могут быть достигнуты лишь при использовании кабелей-тросов с обтекателями, без которых глубины погружения будут раза в полтора меньше.

Система Seapfish Mk2 имеет форму летающего крыла, снабженно-го раздельно управляемыми закрылками, что позволяет ему перемещаться по синусоиде или менять горизонты буксировки. К сожалению, малая площадь концевых килей не обеспечивает носителю надежную устойчивость при буксировке. Более совершенными носителями являются «Бетфип-2» фирмы «Guildline Instruments» (Канада) и Sea-Seag фирмы «Chelsea Instrument Ltd» (Великобритания), выполненные по самолетной схеме с двумя крыльями и однокилевым хвостовым оперением с горизонтальными и вертикальными рулями. Для увеличения устойчивости сечение самого корпуса носителя имеет овальную форму с боковым сжатием. При этом на Sea-Seag установлен кормовой винт с генератором, что позволяет системе работать в автономном режиме без кабеля на тросе. Подобная конструкция, правда, несколько увеличивает габариты при наличии выступающих частей, что ухудшает гидродинамические характеристики, вызывает определенные эксплуатационные сложности и ограничения.

Наибольшее распространение получили буксируемые системы для средних глубин. Например, носитель U-Tow фирмы «Valeport» при ширине, сопоставимой с толщиной, с вертикальным килем и двумя небольшими управляемыми боковыми крылышками, расположенными по центру задней части корпуса. В носителе предусмотрены

Таблица 15.6

## Технические характеристики некоторых буксируемых систем

| Буксируемая система | Глубина, м | Скорость, узлы | Полный объем, л | Кабель-трос |           | Габаритные размеры, см | Масса, кг | Тип СЦ-зонда | Дополнительные устройства и другие особенности* |
|---------------------|------------|----------------|-----------------|-------------|-----------|------------------------|-----------|--------------|-------------------------------------------------|
|                     |            |                |                 | Диаметр, мм | Число жил |                        |           |              |                                                 |
| CTD Chain           | 270        | 8              | —               | 9,58        | 1         | 9×3×17                 | 0,6       | CTD-40       | 9, 11, 15, 16                                   |
| Mini BAT            | 60         | 3,0—10         | 25              | 4,75        | 1; 4      | 75×32×70               | 7,0       | Guidline     | 2, 9, 11, 14, 15                                |
| BIO-FISH            | 60         | 3,0—8          | 25              | 4,75        | 3         | 75×32×70               | 7,0       | SMP-PROBE    | 2, 9, 11, 16                                    |
| Seafish Mk1         | 100        | 2,0—10         | 25              | 6,35        | 1; 4      | 100×13×75              | 34,0      | OS 200       | 2, 7, 9, 10, 11                                 |
| Seafish Mk2         | 500        | 2,0—10         | 40              | 6,35        | 1; 4      | 100×14×80              | 50,0      | 911 plus     | 2, 7, 8, 9, 10, 11, 13                          |
| Bergfin-2           | 400        | 3,0—12         | —               | 8,20        | 7         | 180×90×125             | 86,9      | Guidline     | 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15                           |
| Sea-Sear            | 500        | 4,5—12         | 120             | 9,53        | 7         | 150×98×160             | 150,0     | MARK-III (C) | 1, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 15                    |
| U-Tow               | 100        | 4,0—20         | 60              | 8,20        | 7         | 120×48×31              | 100,0     | 600 MK3      | 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12                 |
| Aquashuttle Mk3     | 150        | 5,0—25         | 45              | 8,20        | 1; 7      | 106×50×72              | 66,0      | AQUAPACK     | 1, 2, 8, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 15                 |
| Nu-Shuttle 400      | 150        | 4,5—15         | 80              | 8,20        | 1; 7      | 130×87×40              | 72,0      | То же        | 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 15                 |
| Nu-Shuttle 500      | 150        | 4,5—10         | 100             | 8,20        | 1; 7      | 130×87×50              | 75,0      | *            | 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 15                 |

\*1 — планшет-регистратор; 2 — счетчик планктона; 3 — датчик крена; 4 — датчик дифферента; 5 — датчик курса; 6 — кормовой винт с генератором; 7 — альтиметр; 8 — буксировка по силовому кабелю траектория; 9 — буксировка на постоянной глубине; 10 — компьютерное управление параметрами буксировки; 11 — управление глубиной буксировки; 12 — управление скоростью хода судна; 13 — внутренний процессор для управления параметрами буксировки; 14 — возможность использования оптического кабеля-троса; 15 — возможность использования кабель-троса со шлангом и насосом; 16 — автоматический ввод координат системы GPS; 16 — гирлянда из 25 измерительных устройств через 10—20 м.

датчики килевой и бортовой качки, которые в комплексе с корректирующей компьютерной программой значительно повышают его курсовую устойчивость.

В первом приближении проблема устойчивости носителя при буксировке была решена в конструкции системы Aquashuttle Mk3 фирмы «Chelsea Instrument Ltd» (Великобритания). Форма его корпуса, напоминающая носитель U-Tow, имеет гидродинамически рассчитанный обтекаемый корпус, изготовленный из стеклопластика с внутренней стальной рамой. Носитель снабжен двумя хорошо развитыми вертикальными килями, соединенными в своей верхней части управляемым крылом. В случае буксировки носителя со скоростью 10—15 узлов в его средней части устанавливаются два небольших крыла.

В середине 90-х годов фирма «Chelsea Instrument Ltd» выпустила новую буксируемую систему Nu-Shuttle, предназначенную для меньших скоростей буксировки, что позволило упростить технологию изготовления корпуса. Носитель имеет плоские боковые поверхности, плавно переходящие в кили, и может иметь две модификации по ширине (значит, и по объему). Кстати, эта фирма, специализирующаяся именно на разработке и выпуске буксируемой аппаратуры, единственная специально разработала для оснащения буксируемых систем свой СТД-зонд AQUAPACK, имеющий хорошие метрологические характеристики, большое число дополнительно присоединяемых датчиков и других устройств.

## 15.4. Автономные измерительные системы

Автономные измерительные системы (АИС), измеряющие, как правило, несколько океанографических параметров (включая и характеристики течений) в течение длительного времени с определенной дискретностью, используются чаще всего в составе автономных буйковых станций. Подобная методика использования АИС позволяет получать временную изменчивость измеряемых параметров на нескольких горизонтах, а при постановке серии АВС и пространственно-временную изменчивость. Рассмотрим устройство некоторых, наиболее известных, АИС.

Самой распространенной автономной измерительной системой у нас в стране является *автономный измеритель течений, температуры, электропроводности и глубины погружения (АЦИТ)*, предназначенный для работы на глубинах до 6000 м. Корпус прибора цилиндрической формы диаметром 220 мм и высотой 2000 мм, выполнен из немагнитного титанового сплава, обладающего большой прочностью и стойкостью к воздействию морской воды (рис. 15.8). На верхней крышке цилиндра расположены датчики температуры, УЭП морской воды и гидростатического давления со специальным ограждением от механических воздействий. Двухкомпонентный датчик скорости течений с решетчатым ограждением расположен под нижней крышкой цилиндра. Двухкомпонентный принцип измерения скорости течения не требует ориентации прибора по потоку, по-



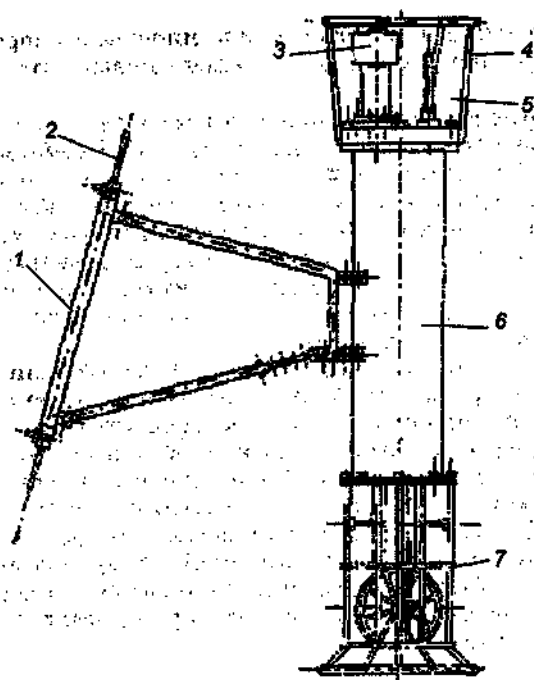


Рис. 15.8. Внешний вид АПИТ.

1 — кронштейн; 2 — трос; 3 — датчик электропроводимости; 4 — защитное ограждение; 5 — датчик температуры; 6 — корпус; 7 — блок пропеллерных вертушек.

этому корпус не снабжен рулевым оперением. Прибор крепится к тросу с помощью специального кронштейна с раздвижным нижним основанием — для регулировки угла подвески прибора, что обеспечивает приблизительно вертикальное положение корпуса прибора.

Двухкомпонентный датчик скорости течений относится к пропеллерному типу, два лопастных винта в обтекателях с взаимно перпендикулярными горизонтальными осями вращения. Через редукторы и магнитные муфты вращение пропеллеров передается внутрь корпуса на потенциометрические преобразователи. В случае отклонения оси прибора от вертикали в показания датчика скорости вводится поправка, которая корректируется показаниями датчика угла наклона корпуса прибора от вертикали в плоскости наклона троса. Допустимый угол наклона  $30^\circ$ .

Преобразование числа оборотов пропеллеров в электрическое напряжение осуществляется с помощью двух проволочных круговых потенциометров. Среднее значение угловой скорости каждого пропеллера измеряется числом их оборотов за период осреднения, равный интервалу между циклами измерений. Использование пропеллеров реверсивного типа позволяет отфильтровывать знакопеременные волновые составляющие течения и устранять влияние раскачивания несущего троса.

Датчик угла наклона прибора от вертикали представляет собой тороидальное кольцо с внутренней полостью, до половины заполненной электропроводной жидкостью, в которой расположены питаю-

щие и токоъемные электроды. Электропроводная жидкость и система электродов образуют потенциметрическую схему. Выходное напряжение датчика формируется разностью уровней жидкости в двух половинах кольца за счет изменения переходного сопротивления жидкость — кольцо. Протекание жидкости из одной половины в другую при наклоне прибора демпфируется капиллярным отверстием, через которое сообщаются полости. Датчик угла наклона конструктивно объединен в один узел с магнитным компасом.

Двухкомпонентный способ измерения скорости течения предполагает, что угловая ориентация корпуса прибора относительно стран света известна. Угловое положение прибора измеряется магнитным компасом, обладающим интегрирующими свойствами. Кратковременная стабилизация прибора по направлению достигается способом его подвески на кронштейне к несущему буйрепу. При такой подвеске прибор стабилизируется в плоскости наклона троса за счет свисания на кронштейне. Магнитный компас с потенциметрическим электролитическим преобразователем угла разворота компасной картушки в электрический сигнал состоит из котелка с водно-спиртовым раствором солей для обеспечения электропроводности и плавающей в нем компасной картушки. Жидкостный преобразователь угла поворота картушки в напряжение переменного тока является линейным потенциометром. При изменении угла ориентации производится его осреднение за счет заданной и согласованной с дискретностью измерений инерционности специального миниатюрного магнитного компаса объемом 2 см<sup>3</sup>. Второй компас является как бы магнитным демпфером и выполняет функцию интегратора измеряемого угла. Внутренняя полость его заполнена маслом определенной вязкости.

Диапазон измерения скорости 0,03—2,0 м/с, чувствительность 0,01 м/с, погрешность измерения  $\pm(0,02 \pm 0,5V)$ , время осреднения скорости 5—60 мин, погрешность канала измерения направления  $\pm 10^\circ$ , чувствительность 1°, время осреднения показаний 3—60 мин.

Датчик температуры — платиновый ПТС с сопротивлением 500 Ом при 0 °C — помещен в медный герметично закрытый цилиндр. Диапазон измерения температуры -2...38 °C с предельной погрешностью  $\pm 0,07$  °C и чувствительностью 0,01 °C, постоянная времени 8 с, а с использованием дополнительного кожуха, надеваемого на оболочку датчика, 180 с.

Датчик УЭП индуктивного типа представляет собой конструкцию из двух тороидальных трансформаторов с ферритовыми сердечниками, заключенными в общую изоляционную оболочку с центральным отверстием, калиброванным с помощью стеклянной трубки со строго определенными геометрическими размерами. В приборе используется компенсационный метод измерения электропроводности, при котором напряжение на втором трансформаторе сводится к нулю путем пропускания по дополнительной обмотке встречного тока, равного току в витке воды, но противоположного направления. Диапазон измерения УЭП 0—7 См/м с предельной погрешностью  $\pm 0,005$  См/м и чувствительностью 0,002 См/м.

Датчик глубины погружения представляет собой манометр пружинного типа с индуктивным преобразователем перемещения чувствительного элемента в электрический сигнал. В качестве пружинного элемента используется манометрическая трубка Бурдона. Индуктивный преобразователь выполнен на ферритовом сердечнике чашечного типа с переменным зазором для образования регулируемой индуктивности. Датчик обеспечивает высокую разрешающую способность на поверхности (около 0,2 м) с плавным уменьшением до 9 м на предельной глубине. Погрешность измерений составляет  $\pm(1 \text{ м} + 1 \% H)$ .

Сигналы с датчиков поочередно подключаются коммутатором каналов к нуль-органу 12-разрядного преобразователя поразрядного уравнивания с трансформаторным компенсатором напряжения. Погрешность цифрового преобразователя не более  $\pm 0,01 \%$ . Запись измеряемых величин осуществляется на магнитную ленту в виде последовательного двоичного кода.

Задаваемая дискретность измерений 2, 30, 300, 900, 1800 и 3600 с. Длительность цикла измерений 25 с. Питание прибора постоянным напряжением 9 В обеспечивается 12 элементами типа 373. Запас магнитной ленты и источников питания обеспечивает 10 000 циклов измерений всех параметров, что при дискретности 1 ч соответствует 1 году автономной работы. Масса прибора 36 кг. Обработка получаемой информации осуществляется на борту судна, где она распечатывается на телетайпной ленте или вводится в ЭВМ с помощью устройства обработки данных.

С целью устранения принципиальных недостатков АЦИТ в ААНИИ на его базе был создан унифицированный измерительный комплекс АЦИТ-У. Он включает измеритель характеристик течений АЦИТ-У-01, STD-измеритель АЦИТ-У-02, блок обработки данных, блок интерфейсной связи; причем модули АЦИТ-У-01 и АЦИТ-У-02 можно использовать как по отдельности, так и в комплекте. В новой системе улучшены метрологические характеристики; реализовано векторное осреднение скорости течения; обеспечено непосредственное сопряжение измерительных модулей со средствами вычислительной техники; предусмотрена автокалибровка каналов измерения температуры, УЭП и давления, что должно обеспечивать их более высокие точностные характеристики.

Фирма «Интероушен» (США) выпускает измеритель модели 196-RM, предназначенный для измерения скорости и направления течений, температуры и электропроводимости морской воды, гидростатического давления, скорости звука в воде, концентрации растворенного кислорода, рН, степени турбулентности и ионизации морской воды.

В качестве датчика скорости течения используется ротор Савониуса, направление вектора скорости относительно магнитного меридиана измеряется путем ориентации прибора по потоку магнитным компасом с потенциометрическим выходом. Скорость течения измеряется в диапазоне 0—8 м/с с основной погрешностью  $\pm 2 \%$  при постоянной времени 1 с. Направление определяется с погрешностью  $\pm 2^\circ$  при постоянной времени 100 мс.

Измерение температуры осуществляется системой из двух датчиков: платинового ПТС (постоянная времени 1,4 с) и термистора с линеаризованной шкалой ( $\tau = 60$  мс) в диапазоне  $-5...45^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,02^\circ\text{C}$ .

Датчик УЭП — кондуктометрическая ячейка — измеряет электропроводимость в диапазоне  $0-65$  мСм/м с погрешностью  $\pm 0,02$  мСм/м при постоянной времени 20 мс.

Содержание растворенного кислорода измеряется полярографической ячейкой в диапазоне  $0-20$  мл/л с погрешностью  $\pm 0,1$  мл/л при постоянной времени 5—10 с; pH измеряется в диапазоне 2—12 с погрешностью  $\pm 0,05$  при постоянной времени 40 мс. Соленость определяется также по содержанию ионов в диапазоне  $0-45$  ‰ с точностью  $\pm 0,02$  ‰ при постоянной времени 1,4 с. Степень турбулентности определяется в пределах  $0-100$  % с погрешностью  $\pm 2$  % при постоянной времени 50 мс. Гидростатическое давление измеряется в диапазоне  $0-600$  бар с погрешностью  $0,2$  % от полной шкалы при постоянной времени 25 мс.

Получаемая информация в цифровом виде записывается на магнитную ленту. Программное устройство прибора формирует импульсы опроса измерительных каналов с дискретностью 10—15 мин. Автономность работы до 30 сут. Масса прибора 48 кг.

Эта же фирма выпускает измеритель *S4*, предназначенный для измерения скорости и направления течений, температуры, УЭП морской воды и гидростатического давления на глубинах до 1000 м в составе АБС. Корпус прибора изготовлен в виде сферы диаметром 25 см из пластика на основе эпоксидных смол. Прибор в воде имеет нейтральную плавучесть. Внутри корпуса прибора располагаются электронные узлы измерительных схем, микропроцессор для векторного осреднения скорости и коррекции характеристик датчиков, блок полупроводниковой памяти емкостью 128 кбайт и блок питания на литиевых элементах.

Для измерений скорости течений по горизонтальным осям корпуса расположены четыре электрода двухкомпонентного электромагнитного измерителя. Диапазон измерений  $0-3,5$  м/с, погрешность  $\pm(1+2V) \cdot 10^{-2}$  м/с, чувствительность  $0,002$  м/с. Ориентация приборной системы координат определяется по магнитному компасу с погрешностью  $\pm 2^\circ$  и чувствительностью  $0,5^\circ$ . Температура измеряется в диапазоне  $-2,5...86^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , электропроводимость в диапазоне  $1-70$  мСм/см с погрешностью  $\pm 0,2$  мСм/см, гидростатическое давление в диапазоне  $0-100$  бар с погрешностью  $\pm 5$  бар.

Дискретность измерений в приборе 15 мин, автономность — около года. На автономной буйковой станции прибор крепится с помощью проходящей сквозь корпус самопишуща питанги, способной выдерживать нагрузку до 4,5 т. Масса прибора на воздухе 8 кг.

Норвежская фирма «Ондеро инструменте» выпускает измерители *RCM4S*, *RCM5*, предназначенные для измерения скорости и направления течений, температуры, электропроводимости морской воды и гидростатического давления. Прибор с корпусом цилиндрической формы, в верхней части которого располагаются датчики, подвешен-

вается в разрыв троса АБС и ориентируется с помощью хвостового оперения по течению.

Вращение датчика скорости (ротор Савониуса) через магнитную муфту передается внутрь корпуса и через редуктор подается на ось прецизионного проволоочного потенциометра. Ползунок потенциометра включен в мостовую схему, уравнивание которой осуществляется 10-разрядным преобразователем аналог-код с поразрядным уравниванием. Для вычисления значений скорости течения используется разность между двумя соседними отсчетами. Диапазон измерения скорости 0,025—2,5 м/с, чувствительность 0,0025 м/с, относительная погрешность  $\pm 5\%$ .

Положение корпуса в пространстве определяется магнитным компасом, показания которого однозначно характеризуют направление течения. Компас имеет потенциометрический выход. Рабочий объем компаса помещен в соленоид. При подаче на соленоид тока контакт, установленный на катушке, прижимается к потенциометру. Контакт катушки включен в мостовую схему аналого-цифрового преобразователя. Погрешность измерения направления  $\pm 7,5^\circ$ , чувствительность 0,35°.

Температура воды измеряется термистором с S-образной характеристикой, изменение сопротивления которого преобразуется в 10-разрядный двоичный код, в диапазоне  $-2,46 \dots 36^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ .

Электропроводимость воды измеряется датчиком индуктивного типа в диапазоне 0—700 мСм/см с погрешностью  $\pm 0,002$  мСм/см, гидростатическое давление — с помощью трубки Бурдона с потенциометрическим преобразователем в диапазоне 0—400 (0—500) бар с точностью  $\pm 1\%$ . Предельная глубина погружения RSM-4 — 4000 м, RSM-5 — 5000 м. Допустимый угол наклона прибора  $12^\circ$ .

Программное устройство, помещенное в корпусе прибора, формирует сигнал опроса измерительных каналов, содержит кварцевые часы и счетчиковый делитель частоты. Сменный кварц позволяет установить следующую дискретность измерений: 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 60 и 180 мин; результаты измерений откладываются в магнитной памяти 10-разрядным двоичным кодом. Емкость памяти составляет 10 000 отсчетов. Масса прибора на воздухе 27 кг. Прибор RSM-4 снабжен акустическим излучателем для дистанционной передачи результатов измерений.

## Глава 16

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

#### 16.1. Особенности сбора информации в процессе океанографических работ

Развитие современной океанологии связано с решением большого круга задач. Это:

- 1) накопление общих научных знаний о Мировом океане; воссоздание истории его возникновения и происшедших изменений; исследование всех процессов, происходящих в Мировом океане;
- 2) разработка надежных алгоритмов гидрологических процессов и процессов взаимодействия океана и атмосферы;
- 3) проведение перспективной и текущей разведки пищевых и сырьевых ресурсов Мирового океана и разработка научных рекомендаций по их промышленному использованию;
- 4) подготовка рекомендаций по охране природных богатств Мирового океана, защите его от загрязнения и решение экологических проблем;
- 5) обеспечение безопасности мореплавания;
- 6) подготовка научных и технических рекомендаций для проектирования новых типов подводных и надводных судов и различных морских инженерных сооружений.

Измерения океанологических характеристик, как правило, производятся в динамически неустойчивой стратифицированной среде, физико-химические параметры которой изменяются как во времени, так и в пространстве. Эти обстоятельства выдвигают жесткие требования к организации, методике, технике измерений и к выбору технических средств. И на первое место ставятся задачи, касающиеся определения продолжительности и пространственно-временной дискретности измерений, их репрезентативности, выбора аппаратуры с оптимальной информативностью и чувствительностью, определения скорости перемещения датчиков и т. д. Для ответа на эти вопросы необходимо располагать определенными сведениями о характерных пространственно-временных масштабах явлений, происходящих в океане. При постановке океанографических наблюдений всегда необходимо также ясно представлять, какие масштабы изменчивости будут исследоваться в связи с поставленной задачей. Результаты выполненных в последние десятилетия океанографических исследований позволяют судить о значительной изменчивости процессов в Мировом океане, которые можно классифицировать следующим образом:

— мелкомасштабные явления (временной масштаб от долей секунды до десятков минут) с пространственными масштабами в пределах от сантиметров до десятков метров;

— мезомасштабные явления (от нескольких часов до суток) с пространственными масштабами от сотен метров до десятков километров;

— синоптическая изменчивость (от суток до месяцев) с пространственным масштабом от десятков до сотен километров;

— сезонные колебания (годовой период и его гармоники) с пространственными масштабами от сотен до тысяч километров, вызванные внутрисезонными колебаниями океанологических характеристик, обусловленных сезонным ходом солнечной радиации;

— междугодовая изменчивость (несколько лет) с пространственными масштабами от сотен до тысяч километров;

— внутривековая и междувекровая изменчивость (от десятков до сотен лет) с пространственными масштабами, сопоставимыми с размерами океанов при глобальных изменениях явлений в океане, связанных с общим изменением климата.

При исследовании мелко- и мезомасштабных явлений в океане изучаются океанская турбулентность, поверхностные и внутренние волны различных периодов, приливо-отливные и инерционные колебания, флуктуации микроструктуры океана и т. п. За основу наблюдений здесь принимаются многосуточные (10—15 сут) и многочасовые (50—100 ч) исследования на дрейфовых и якорных океанографических станциях, на стационарных и передвижных платформах, заякоренных и дрейфующих буйх-лабораториях, подводных аппаратах, при работе на полигонах, при выполнении океанографических съемок и т. д. Эти методы наблюдений используются в сочетании с зондирующими и буксируемыми системами малоинерционных датчиков. Важными требованиями являются: сохранение относительной стабильности положения измерителей в необходимой точке или на заданной траектории; обеспечение оптимальной полосы пропускания измерительных преобразователей информации (датчиков-регистраторов). При этом дискретность измерений выбирается в пределах от  $5 \cdot 10^{-3}$  с до 8—10 мин с постоянной времени датчиков  $3 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^2$  с в стационарных условиях.

Синоптическая изменчивость явлений в океане связана с воздействием атмосферных возмущений, образований типа планетарных волн, крупномасштабных вихрей в открытых частях океана, плотностных колебаний уровня, процессов образования и таяния льда. При экспериментальных исследованиях подобной изменчивости изучаются динамика фронтальных зон и явления меандрирования струйных течений, обусловленных гидродинамической неустойчивостью средних потоков, что приводит к образованию вихрей типа рингов Гольфстрима. Сложная динамическая структура океанических процессов синоптического масштаба вызывает необходимость детальных и длительных наблюдений продолжительностью от 100—150 сут до 1,5—2 лет. Экспериментальные исследования этого типа изменчивости проводятся с помощью НИС, автономных дрейфующих и заякоренных буйковых станций, оснащенных комплексом измерительной аппаратуры. Наблюдения проводятся и при производстве синхронных океанографических съемок, и при работах на предварительно обследованных океанических полигонах. Особое место при этом за-

нимают дистанционные методы зондирования океана, обеспечивающие изучение синоптической изменчивости верхнего слоя океана в глобальных масштабах, с автоматической фильтрацией данных по площади от 20 до 1200 км<sup>2</sup>.

Исследование процессов крупномасштабной (сезонной, между-годовой и внутривековой) изменчивости океанологических параметров имеет большое значение для разработки долгосрочных прогнозов погоды. При этом необходимы многолетние наблюдения продолжительностью от одного до 50 лет и более с дискретностью измерений 1—20 сут. Наблюдения проводятся на прибрежных и островных ГМС, судах погоды, при выполнении стандартных и вековых океанографических разрезов и съемок, на автономных буйковых станциях, а также с использованием дистанционных методов исследования океана. При крупномасштабных исследованиях необходимы стандартность методики, постоянство районов и точек наблюдений на протяжении длительного времени. Кроме того, желательно использовать аппаратуру и методику измерений, обеспечивающие эквивалентное время интегрирования измеряемых характеристик в диапазоне от 8 до 12 сут.

Рассмотренное разделение экспериментальных работ в океане в зависимости от масштаба изменчивости процессов в Мировом океане крайне необходимо при выборе общей стратегии исследований, дает возможность заранее оценить продолжительность наблюдений, объективно подойти к выбору измерительных и технических средств для проведения океанографических работ, установить критерии экономической эффективности решения поставленных исследовательских задач.

Стремительное развитие науки и техники в последнее время позволяет использовать в океанологической практике принципиально новые средства, пригодные для выполнения океанографических работ. К таким техническим средствам кроме традиционных НИС и автономных буйковых станций (АБС) относятся: авиация, искусственные спутники Земли, глубоководные обитаемые и необитаемые аппараты, океанографические буи и платформы, океанографические измерительные системы, устанавливаемые на дне океана, и др.

## 16.2. Научно-исследовательские суда

Основной функцией научно-исследовательских судов (НИС) являются сбор и первичная обработка информации о Мировом океане, атмосфере над ним, строении его дна, а также о флоре и фауне. Изучение Мирового океана связано с проведением дорогостоящих морских экспедиций. Важнейшим показателем эффективности использования НИС является объем информации, который может быть собран за время экспедиционного рейса.

До 60-х годов XX в. НИС рассматривались только как средства для размещения необходимого оборудования, аппаратуры и научного персонала. Для исследовательских целей использовали транспортные, рыболовные, вспомогательные суда, несколько доработав их.



В то время аппаратура, используемая в океанологической практике, была довольно примитивной, не комплектовалась в измерительные системы, а требования к погрешностям характеристикам были невысоки. Повышение требований, предъявляемых к информации о процессах, протекающих в океане и в атмосфере над ним, повлекло за собой усложнение научно-исследовательской аппаратуры, появление принципиально новых ее образцов и совершенствование методов проведения исследований. Начиная с 60-х годов все ведущие морские страны стали создавать НИС по специально разработанным проектам. И сегодня переоборудование судов других назначений в научно-исследовательские — уже не правило, а редкое исключение.

После войны СССР по репарациям из Германии получил несколько морских судов, из которых в 1946 г. для ИО АН СССР был отобран сухогруз водоизмещением около 6000 т. По своим размерам он превосходил все исследовательские суда, используемые до этого. Так, например, хорошо зарекомендовавшие себя в 20-е и 30-е годы при работах на севере НИС «Персей» и «Н. Книпович» были гораздо меньших размеров. В 1948 г. после полного переоборудования, создания полного набора лабораторий, оснащенных современной для того времени аппаратурой, первое специальное научно-исследовательское судно вошло в строй и получило название «Витязь» — в честь корвета адмирала С. О. Макарова и брига «Витязь», на котором Н. Н. Миклухо-Маклай добрался до Новой Гвинеи.

При подготовке к проведению МГТ в 1957—1959 гг. для Морского гидрофизического института на верфи «Нептун» в Ростове было построено новое НИС «Михаил Ломоносов» водоизмещением 6000 т. В это же время наш исследовательский флот пополнился уникальной немагнитной шхуной «Заря», предназначенной для исследования магнитного поля Земли в Мировом океане. В 60-е годы было решено перейти к судам еще более высокого класса. Серию пассажирских теплоходов на верфи г. Висмара было решено переоборудовать в НИС. И в декабре 1965 г. И. Д. Папанин принял головное судно этой серии — «Академик Курчатов». Позднее были спущены на воду также суда этой серии: «Профессор Визе», «Академик Королев», «Академик Ширшов», «Профессор Зубов», «Дмитрий Менделеев», «Академик Вернадский», «Молдавия», «Аджария». Для проведения акустических работ в океане в 1964—1965 гг. на Северной верфи в Ленинграде были переоборудованы грузовые суда, получившие название «Петр Лебедев» и «Сергей Вавилов», а в конце 80-х годов для этих же целей в Николаеве были построены более современные суда «Академик Андреев» и «Академик Константинов» водоизмещением около 11 000 т.

В конце 60-х годов значительно пополнился наш исследовательский флот судами погоды («Муссон», «Прилив» и другими), предназначенными для длительных океанографических работ в океане и принадлежащими Госкомгидромету. К сожалению, суда погоды, предназначенные для работы в Атлантическом океане, после распада СССР перешли под юрисдикцию Украины, так как они были приписаны к Одессе. В 80-х годах вошла в строй новая серия крупнотоннажных исследовательских судов, хорошо оборудованных для проведения

комплексных океанологических исследований и с прекрасными бытовыми условиями для экспедиционного состава и экипажа судна. К ним относятся, например, «Академик Александр Виноградов», «Академик Иоффе» и «Витязь», продолжатель русской традиции названий исследовательских судов.

Начало комплексным исследованиям приантарктических вод было положено дизель-электроходом «Обь» в 1955—1956 гг., доставившим к берегам Антарктиды первую антарктическую экспедицию. На смену «Оби» пришел «Михаил Сомов» — судно активного ледового плавания. Построенное на верфи в г. Херсоне, оно оборудовано вертолетной площадкой, океанологическими лебедками и рядом научных лабораторий. И наконец в конце 80-х годов в строй вступил специально построенный ледокол «Академик Федоров», оборудованный также и для проведения океанографических работ, водоизмещением около 16 000 т.

В строй научного флота вошли такие суда, как «Юрий Гагарин», «Космонавт Владимир Комаров», «Академик Сергей Королев» — корабли космической службы. Кроме осуществления корректировки полетов космических аппаратов, они способны осуществлять научные исследования в верхних слоях атмосферы и в толще вод Мирового океана.

К настоящему времени у нас в стране сформировался довольно большой флот достаточно хорошо оснащенных исследовательских судов, принадлежащих РАН, Росгидромету, Министерству обороны и т. п. Но, к сожалению, в данный момент из-за недостаточного финансирования продолжает исследование Мирового океана лишь небольшая часть судов, которые чаще всего используются для выполнения совместных научных проектов с учеными других стран.

Специфика океанографических работ предъявляет к экспедиционным судам определенные требования. Эти суда прежде всего должны обладать хорошей мореходностью, т. е. способностью осуществлять не только безопасные и эффективные плавания в любой сезон года, в любых широтах и при самых сложных гидрометеорологических условиях, но и выполнять океанографические работы, когда судно на ходу, стоит на якоре или лежит в дрейфе, так как 50—80 % времени рейса НИС эксплуатируются на малых ходах (например, с буксируемыми системами) либо выполняют океанографические станции. Кроме того, судно должно быть приспособлено для выполнения научных исследований при волнении 5—6 баллов. Это требование вытекает из анализа распределения вероятности встречи в океане с волнением различной интенсивности. Если судно пригодно для выполнения океанографических работ при волнении до 4 баллов, то половину времени рейса оно будет простаивать в ожидании улучшения гидрометеорологических условий. Возможность проведения работ при волнении 5 баллов сокращает время простоя до 25—30 %, а при волнении 6 баллов это время составляет 5—10 %. Вероятность же встречи в океане с волнением 7 баллов и выше сравнительно мала.

Суда должны быть оборудованы устройствами и приспособлениями, обеспечивающими постановку на якорь на значительных глубинах, постановку АВС, а также иметь лебедки и вспомогательные

механизмы для спуска за борт и подъема приборов, буксировки океанографической аппаратуры. При проектировании судна число, типы и характеристики лебедок, кран-балок, откидных площадок и другого палубного оборудования должны быть рассчитаны с учетом конкретного назначения НИС и принятой методики работы с научным оборудованием.

Все суда должны иметь определенное число лабораторий, которые удобно расположены на соответствующих палубах, снабжены необходимым энергопитанием и в которых может быть размещена нужная аппаратура, вести первичная обработка результатов наблюдений, подготовка и ремонт приборов и оборудования.

Все НИС должны быть оборудованы совершенными радионавигационными системами и системой динамического позиционирования. На них целесообразно устанавливать системы навигации с использованием ИСЗ, поскольку от точности определения местоположения судна в море в большой степени зависит достоверность и ценность информации. Все это существенно улучшит условия проводимых исследований. На них должны быть установлены многолучевые эхолоты, докаторы бокового обзора ближнего и дальнего действия; развитые вычислительные комплексы, объединяющие мощные мини- и микроЭВМ, для гибкого разделения общих ресурсов памяти и быстрой работы, что позволит решать тактические и стратегические задачи. НИС должны быть комплексно укомплектованы исследовательскими техническими средствами.

Практика эксплуатации НИС показывает, что для работы судна в океане его водоизмещение должно быть не менее 500 т. С учетом перспективы развития океанографических исследований следует признать, что наибольший практический интерес представляют суда водоизмещением 2000—4000 т. На судах такого водоизмещения можно разместить необходимые приборы и устройства, т. е. весь современный информационно-вычислительный комплекс, при этом обеспечиваются высокие мореходные качества. Американские специалисты на основе опыта эксплуатации современных НИС определили оптимальное водоизмещение НИС, работающего по стандартной программе. Каждое рассматриваемое судно оценивали в условных баллах по следующим параметрам: мореходность, маневренные качества, размеры лабораторных помещений, состав научного комплекса, штурманское оборудование, уровень шумов и вибрации. На основе проведенных расчетов сделали вывод, что оптимальное водоизмещение универсального океанского исследовательского судна — около 4000 т, а морского — 1250 т.

В океанологической практике к настоящему времени уже сложилось несколько типов НИС в зависимости от архитектурных особенностей надстроек, которые можно разделить следующим образом:

— суда с баком и кормовой удлиненной надстройкой и суда с носовой и средней надстройками. Они имеют относительно небольшую площадь открытой части палубы, поэтому часть аппаратуры приходится опускать в воду с палуб надстроек, что увеличивает опасность удара приборов о борт судна при качке;

— суда со средней надстройкой, где для проведения работ используются носовая и кормовая части верхней палубы. Правда, в этом случае при сильном волнении одна из открытых частей верхней палубы, а при доложении судна лагом к волне и обе ее части могут заливаться водой, что ограничивает возможность работы судов в открытом море;

— суда с удлиненным баком, переходящим в среднюю надстройку. Эти суда лишены вышеперечисленных недостатков. Кроме того, в последнее время появились суда со сдвинутой надстройкой к одному, обычно левому, борту. Подобная архитектура позволяет использовать для работы кормовую часть палубы и проход вдоль средней надстройки, что дает определенные преимущества. Места работы на верхней палубе хорошо защищены от ветра и волн с носа и с одного борта; увеличена ширина рабочей площади по одному из бортов; осуществлен вывод выходных отверстий забортных систем на нерабочий борт, можно добиться проведения работ с аппаратурой в «чистой» воде; океанографические работы можно одновременно производить с нескольких лебедок, рассредоточив их на необходимое расстояние; улучшается наблюдение с командных постов за работами с забортной аппаратурой;

— катamarаны до сих пор не нашли широкого использования в океанологической практике, за исключением, возможно, малых судов длиной менее 25 м. По-видимому, даже наличие таких достоинств судов подобного типа, как большая площадь рабочей части верхней палубы по сравнению с однокорпусным судном такого же водоизмещения, меньшая необходимая мощность энергетических установок, хорошая маневренность и устойчивость, не превышает их недостатков: большой строительной стоимости; необходимости дублирования ряда механизмов; воздействия волновых ударов в районе носовой части соединительного моста.

Следует отметить, что НИС отличаются высокой стоимостью конструирования, строительства и эксплуатации, которая в 1,5—2 раза превосходит стоимость транспортных и рыболовных судов подобных размеров. Вполне вероятно появление в будущем парусных НИС, оборудованных современными автоматизированными системами управления парусами, что значительно снизит шумность судов, удешевит их эксплуатацию, даст возможность с большей простотой решать многие задачи океанологии.

### 16.3. Автономные буйковые станции

Использование автономных буйковых станций (АБС) в океанологической практике позволяет исследовать временную изменчивость океанологических характеристик при проведении долговременных измерений в одной точке при любых погодных условиях. В арсенале технических средств для проведения океанографических работ якорные АБС появились в середине XX в. Первые методические разработки по постановке АБС были выполнены под руководством В. В. Тимонова и Н. Н. Сысоева на Черном море в 1935—1938 гг. Изначаль-

но АБС были предназначены для долговременных измерений в одной точке на разных глубинах океанографических характеристик с помощью автоматической измерительной аппаратуры и получили широкое распространение. Так, например, в 1954 г. экспедицией ААНИИ в Карском море было поставлено свыше 20 АБС; при исследовании крупномасштабных синоптических вихрей в Атлантическом океане по международному проекту ПОЛИМОДЕ в 1977—1978 гг. было выставлено более 45 АБС; по программе «First GARP Global Experiment» для изучения поверхностных течений было задействовано 368 дрейфующих буйев. Планируется создание региональных и международных сетей АБС, охватывающих важнейшие районы Мирового океана и предназначенных для получения широкой и оперативной информации о состоянии Мирового океана и атмосферы над ним и для его прогнозирования.

Однако и АБС не являются идеальным инструментом для исследования океана. Под воздействием ветра, волнения, течений они подвержены сложным движениям — от относительно плавных перемещений, создаваемых переменным по скорости и направлению потоком воды, до высокочастотных вынужденных и свободных колебаний. Все это в значительной степени влияет на показания различных измерителей, искажая измеряемые величины. Характер подобных искажений существенным образом зависит от конструктивных особенностей и параметров буйковых станций.

**Типы и состав АБС.** В зависимости от назначения и способа постановки можно выделить пять основных типов АБС (рис. 16.1): а) с поверхностным, поставленным на якорь, несущим буйем; б) с притопленным несущим буйем; в) комбинированные — с притопленным и поверхностным буйами; г) дрейфующие; д) с распределенной плавучестью.

Кроме того, в самостоятельную группу можно выделить обитаемые и необитаемые буй-лаборатории. Каждая АБС включает комплекс специального оборудования: несущий буй; становой трос-буйреп (1); размыкатель троса (2); донный якорь; измерительный комплекс (гидрологические, метеорологические и другие измерительные приборы); системы преобразования, обработки и регистрации получаемой информации; системы управления работой измерительных и вспомогательных систем АБС; системы телеметрии (приемо-передающие радиостанции, линии связи с датчиками, включая иногда гидроакустический канал); вспомогательное оборудование (аккумуляторные батареи, энергетические установки для их подзарядки, системы вентиляции, терморегулирования, навигационное обо-

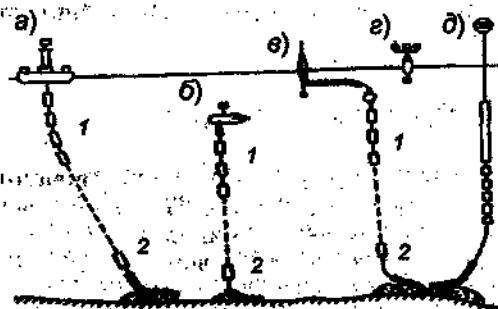


Рис. 16.1. Автономная буйковая станция.

Усл. обозначения см. текст.

ру. Кроме того, в самостоятельную группу можно выделить обитаемые и необитаемые буй-лаборатории. Каждая АБС включает комплекс специального оборудования: несущий буй; становой трос-буйреп (1); размыкатель троса (2); донный якорь; измерительный комплекс (гидрологические, метеорологические и другие измерительные приборы); системы преобразования, обработки и регистрации получаемой информации; системы управления работой измерительных и вспомогательных систем АБС; системы телеметрии (приемо-передающие радиостанции, линии связи с датчиками, включая иногда гидроакустический канал); вспомогательное оборудование (аккумуляторные батареи, энергетические установки для их подзарядки, системы вентиляции, терморегулирования, навигационное обо-

Таблица 16.1

## Технические характеристики буйковых станций

| Характеристика                             | ГМ-46 | ГМ-47 | ГМ-48     | ГМ-49  | ГМ-50  | ГМ-61  |
|--------------------------------------------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| Грузоподъемность, кг                       | 175,0 | 300,0 | 550       | 1000,0 | 1500,0 | 2300,0 |
| Масса буя, кг                              | 150,0 | 170,0 | 200       | 410,0  | 540,0  | 610,0  |
| Масса снаряженного буя, кг                 | 180,0 | 200,0 | 230—250   | 460,0  | 590,0  | 675,0  |
| Диаметр буя, м                             | 0,65  | 0,65  | 0,65—1,00 | 1,0    | 1,0    | 1,0    |
| Длина буя, м                               | 2,60  | 2,90  | 2,6—3,4   | 2,9    | 3,5    | 4,2    |
| Длина буя с мачтой, м                      | 6,30  | 6,60  | 6,6—7,1   | 8,2    | 8,8    | 9,5    |
| Высота нока мачты над поверхностью воды, м | 4,30  | 4,30  | 4,3       | 5,6    | 5,6    | 5,6    |

дование и т. п.). Во время работы в море, особенно при проведении долговременных измерений, АБС подвергаются многократному воздействию штормов, агрессивных свойств морской воды, переменных скоростей течений, что предъявляет высокие требования к их прочности и динамическим характеристикам, от которых зависит качество получаемой информации и снижение возможности потери приборов и информации.

Обычно в отечественной океанологической практике используются АБС с пенопластовыми несущими буями цилиндрической формы, технические характеристики которых приведены в табл. 16.1. В западных странах при постановке АБС в качестве несущего буя используется буй тороидальной формы грузоподъемностью до 2500 кг. Все эти буи используются также и при постановке притопленных станций, которые можно разделить на три вида: АБС с притопленным несущим буюм, с распределенной плавучестью и придонные станции для измерений вблизи дна. АБС и с поверхностным, и с притопленным буями присущи свои достоинства и недостатки.

С помощью буйковой станции с поверхностным несущим буюм можно производить измерения гидрофизических характеристик во всей толще воды на заданных горизонтах наблюдений (с погрешностью примерно  $\pm 0,5\%$  от глубины) с достаточной стабильностью положения измерительной аппаратуры на этих горизонтах при переменной скорости течения, а кроме того, выполнять метеорологические наблюдения. К недостаткам подобных систем относятся качественное ухудшение получаемой информации, вызванное вертикальными и горизонтальными перемещениями буя под воздействием ветра, волнения и течения, передаваемыми через трос всей станции, а также сравнительно невысокая надежность системы при длительных постановках из-за сложных гидрометеословий и агрессивного воздействия морской воды на трос АБС.

При использовании цилиндрических и тороидальных буюв в постановке АБС первые имеют определенные преимущества, так как амплитуда вертикальных колебаний станции на волне в значительной мере определяется формой буя, оказывающей влияние на изменения его плавучести ( $Q$ ) на единицу его осадки ( $h_0$ ) в рабочем положении ( $dQ/dh_0$ ). Так, например, для цилиндрическо-

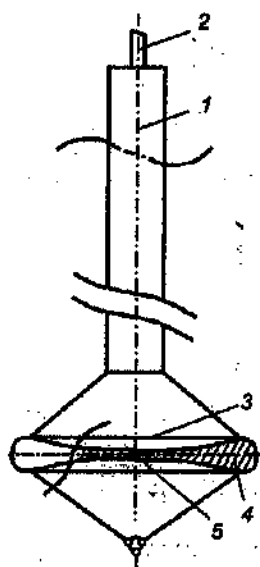


Рис. 16.2. Стабилизированный буй.

Усл. обозначения см. текст.

го буйа типа ГМ-51 эта величина составляет примерно 70 Н на 1 м осадки, а у стандартного тороидального буйа  $dQ/dh_0$  достигает 350—400 Н/м. Это означает, что цилиндроконический буй довольно легко меняет свою осадку, уменьшая тем самым вертикальные колебания всей буйковой системы. Тороидальный же буй хорошо повторяет профиль волны и испытывает вертикальные колебания, близкие к высоте волны.

В 80-х годах XX в. в Ленинградском гидрометеорологическом институте и ЦНИИ «Гидроприбор» выполнены разработки океанографических буйев, предназначенных для постановки АБС (например, Л. И. Воронин, В. И. Дорохин, А. И. Колышев, И. А. Степанюк — РИ, патент 2090482, кл. В 68 В 22/18). Подобная система (рис. 16.2) позволяет стабилизировать в какой-то мере положение несущего буйа на волнении. Устройство представляет собой цилиндрический буй (1) с мачтой (2), ниже которого размещена демпфирующая платформа (3) с площадью максимального сечения, равной площади поперечного сечения буйа. Демпфирующая платформа выполнена двояковогнутой с двумя полусферами (4), обращенными друг к другу вершинами, и центральным отверстием (5), соосным цилиндрическому корпусу буйа. Демпфирующая платформа выполняет роль «парашюта» при вертикальных перемещениях несущего буйа на волнении, а ее центральное отверстие создает скоростную струю в воде, направленную вдоль продольной оси корпуса буйа, что обеспечивает его угловую стабилизацию.

Системы с притопленным несущим буйем позволяют получать более качественную информацию, так как не подвергаются непосредственному воздействию ветра и поверхностного волнения, в результате чего данные АБС обладают более высокой надежностью. Однако им присущ ряд недостатков, особенно при глубоководных постановках.

1. Невозможность измерений в верхнем, деятельном слое океана, расположенном выше притопленного буйа.

2. Невозможность метеорологических наблюдений.

3. Длина буйрепа станции и определяемое этим заглубление буйа рассчитываются на определенную глубину океана. Но фактически глубина места постановки АБС, особенно при пересеченном рельефе и дрейфе судна, отличается от заданной, что вызывает изменение глубины заглубления буйа и, значит, смещение горизонтов наблюдений. Иногда подобное смещение превышает 100 м, а это влияет на получение репрезентативных данных. Для АБС с поверхностным буйем изменение фактической глубины сказывается лишь на значении притравки буйрепа.

4. Увеличение аэро- и гидродинамического давления на поверхностный буй вызывает увеличение осадки буя и натяжение буйрепа, что мало изменяет угол отклонения буйрепа от вертикали и горизонты размещения приборов. Увеличение же гидродинамического давления на притопленный буй, обладающий постоянной силой плавучести, компенсируется натяжением троса при большом отклонении угла от вертикали, что приводит к значительному изменению глубины нахождения приборов (до 100 м).

Одним из наиболее важных элементов АБС, особенно с поверхностным буюм, от которого в значительной мере зависит «живучесть» станции, является *становой трос*. Острой и до сих пор нерешенной проблемой долговременных постановок АБС является коррозия троса в морской воде, в значительной мере уменьшающая прочность буйрепа, ограничивающая длительность измерений из-за аварий и приводящая к потере оборудования. Этот эффект более интенсивно протекает в верхнем, наиболее прогретом, слое до глубины 100—200 м в тропической зоне океана.

К составным частям буйрепа относятся проводники и придонный (якорный) трос. Проводник служит для удержания всей буйковой станции при присоединении, в случае постановки АБС, или рассоединении, в случае подъема АБС, буя с буйрепом. Проводник обычно длиной от 10 до 30 м, в зависимости от расстояния между лебедкой и бортом судна, — это трос того же диаметра, что и верхняя часть буйрепа. Верхний конец проводника заканчивается огоном с коушем, а нижний вплетается в верхнюю часть буйрепа. Придонный (якорный) конец буйрепа устанавливается перед якорной системой, и его диаметр такой же (или больше) диаметра верхнего конца буйрепа. Такой выбор троса объясняется необходимостью устранения возможности образования колышек (петель, изломов) на нижней ступени буйрепа под действием крутящего момента, возникающего при резком ослаблении натяжения троса в момент касания якорем грунта. При последующем натяжении трос в местах образования колышек может легко оборваться. Использование толстого троса уменьшает эту возможность. Длина придонного троса должна быть больше притравки буйрепа, чтобы его нижний (тонкий) конец не мог коснуться дна. Между придонным тросом и якорной системой обязательно устанавливаются вертлюги.

При постановке АБС необходимо учитывать *притравку буйрепа*, минимальное значение которой зависит от точности измерения глубины моря и длины буйрепа. Относительная ошибка измерения глубины эхолотом составляет обычно  $\pm 0,5\%$  и сопоставима с измерением длины троса блок-счетчиком. Но, как правило, АБС с минимальной притравкой (обычно не менее 2 % глубины) может удерживаться на месте якорями лишь при слабых течениях (до 0,5 м/с) и благоприятных погодных условиях. При скорости поверхностного течения до 1 м/с притравка составляет 3—4 % глубины, а при скорости более 1 м/с — 5—6 % глубины.

Нагрузка на буйреп складывается из веса в воде нижерасположенных приборов с кронштейнами, троса и якорей, суммируемого от



якоря до буйа. Таким образом, запас прочности буйрепа должен быть максимальным в его верхней части и уменьшаться от буйа к якорю. Поэтому для уменьшения общего веса буйрепа его изготавливают из тросов равного диаметра, т. е. из равных ступеней, соединенных сплеснями. Длина и диаметр троса каждой ступени определяют требуемым запасом прочности и разрывным усилием троса. Число ступеней может меняться в зависимости от глубины места и наличия троса. Так, при глубине 3000—4000 м буйреп обычно состоит из 3—4 ступеней, а при глубине 5000—6000 м — из 4—5 ступеней. Диаметры тросов двух соседних ступеней не могут различаться более чем на 2 мм.

В последнее время при постановке АБС в качестве буйрепа стали использовать трос из синтетических волокон, что существенно улучшает качество якорных систем. Одним из основных достоинств синтетического троса является небольшой удельный вес, близкий к единице. Благодаря этому уменьшается нагрузка на несущий буй. Этот трос не подвержен коррозии.

Держащая сила якорей должна удовлетворять двум основным условиям: масса якоря должна быть больше максимальной вертикальной силы, передаваемой по тросу к якорю; горизонтальная составляющая силы, передаваемая от троса к якорю, должна быть значительно меньше сил сцепления якоря с грунтом.

Надежной *якорной системой*, как показала практика, является конструкция из трех якорей, скрепленных отрезками цепей длиной 8—10 м. Верхний и средний якоря сегментные (стандартные), а нижний (концевой) — грибовидной формы со штоком. Масса такой якорной системы составляет 450—500 кг. При подобной конструкции верхний якорь создает минимальный угол приложения натяжения от буйа к остальным двум якорям, что позволяет удерживать АБС на месте. При расчете массы якорной системы следует учитывать, что ее вес в воде должен быть несколько меньше запаса плавучести нагруженного буйа. В противном случае, если при постановке АБС якоря не достигнут дна и буй уйдет под воду, то буйковая станция будет потеряна.

Надежное сцепление якоря с грунтом, которого стремятся достичь при постановке АБС, осложняет подъем станции, так как при этом возникают динамические нагрузки, приводящие к обрыву троса. Этот обрыв из-за ослабления верхней части буйрепа, особенно при длительных буйковых постановках, чаще всего происходит как раз сверху. При этом основная часть измерительной аппаратуры тонет. Для устранения этого недостатка в настоящее время используют *размыкатели троса*, которые необходимы также и для обеспечения работы буйковых притопленных и донных станций. Обычно размыкатель устанавливается в нижней части буйрепа перед якорной системой. Наибольшее применение в океанологии нашли гидроакустические размыкатели троса.

В качестве примера можно привести акустический размыкатель троса «Грот-6», разработанный в ААНИИ. Размыкатель «Грот-6»

предназначен для отделения от буйрепа АБС якорной системы по команде с судна по гидроакустическому каналу. Стальной корпус устройства массой до 6 кг, диаметром 105 мм и высотой 200 мм рассчитан на глубины до 6 км. Команда с судна в виде акустического сигнала на кварцовой частоте 16 384 Гц мощностью 10 кВт подается излучателем вызывного устройства. Этот сигнал принимается под водой гидрофоном размыкателя в виде полуволнового вибратора, усиливается резонансным усилителем с кварцевым фильтром, а затем через детектор и интегрирующую цепь запускает в работу исполнительный двигатель мультивибратора, приводящий в движение механизм расцепляющего устройства. Устройство представляет собой крюк и удерживающий его стопор. Дополнительно предусмотрено автоматическое срабатывание размыкателя по команде от таймера в заранее заданный момент времени. Питание двигателя и усилителя обеспечивается в течение 1 года от шести элементов типа 343 (9 В). Существует модификация такой конструкции размыкателя для донных постановок в титановом корпусе диаметром 133 мм, совмещенного с акустическим маяком, запускаемым в работу таймером. Частота следования посылок маяка 0,5 или 1 с после отделения груза и начала всплытия станции. Вызывное устройство дополнено гидрофонами и системой обнаружения и пеленгования станции по сигналам этих маяков.

В последнее время широкое распространение в океанологии нашли дрейфующие буи (дрифтеры), используемые для изучения процессов, протекающих в поверхностном слое океана и в атмосфере над ним. Передача информации о местоположении и гидрометеорологических характеристиках осуществляется по радиоканалу на береговую базу или ИСЗ. Дрифтеры могут обрасываться в океан с судна или летательного аппарата (самолет, вертолет), что позволяет проводить исследования в отдельных районах. Так, например, по программе «Тайрос» в южной части Тихого океана США сбросили 30 буйв для измерения поверхностных течений, атмосферного давления и температуры воздуха с передачей всей получаемой информации через ИСЗ в НУОА. Буи длиной 3,3 м и максимальным диаметром 0,65 м обладали автономностью до 12 месяцев. В ЦКБ ГМП разработан дрифтер-буй длиной 3,7 м, максимальным диаметром 0,8 м и массой 135 кг с автономностью до 18 месяцев. Устройство предназначено для изучения поверхностных течений (определение координат местоположения буя не хуже 3,5 км); определения температуры воздуха в диапазоне от -20 до 40 °C с погрешностью  $\pm 0,1$  °C; температуры воды в диапазоне от -2 до 32 °C с погрешностью  $\pm 0,1$  °C; атмосферного давления от 840 до 1070 гПа с погрешностью  $\pm 1$  гПа; скорости ветра от 1 до 50 м/с с погрешностью  $\pm 2$  м/с; направления ветра от 0 до 360° с погрешностью  $\pm 10^\circ$ . Вся получаемая информация не менее восьми раз в сутки передается через ИСЗ (канал связи КУРС, АРГОС, ГОНЕЦ) в пункты приема информации: Москву, Архангельск, Находку.

При измерении океанологических характеристик в придонных слоях и на дне используются различного типа донные системы с

разными измерительными приборами. В состав этих устройств входят также якоря и акустические размыкатели троса. Так, например, донная система может иметь вид железного пирамидального каркаса, установленного на дне (рис. 16.3).

К вершине каркаса с помощью скобы крепится несущий трос, проходящий внутри стальной трубы и идущий к якорю, а далее к сигнальному бую с вехой. Подобная система часто используется для измерения характеристик придонного течения в мелководных районах (глубины до нескольких десятков метров).

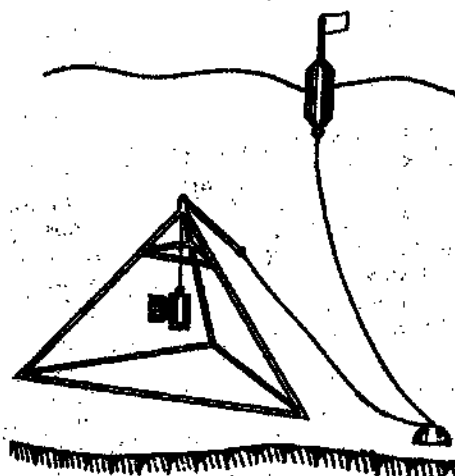


Рис. 16.3. Донная автономная станция.

## 16.4. Буй-лаборатории

Иногда исследование некоторых гидрофизических полей затрудняется самим судном, его дрейфом, турбулентностью потоков от движения судна и шумом от работы двигателей, винтов и т. п. Все это заставляет океанологов искать новые формы и способы океанологических измерений. За последнее время в Италии, России, США и Франции для проведения научно-исследовательских и поисковых работ, особенно при выполнении «тонких» океанологических экспериментов и испытаний высокочувствительной измерительной гидрофизической аппаратуры, создан ряд обитаемых и автономных буй-лабораторий. Эти устройства могут эксплуатироваться в широком диапазоне морских глубин, на них можно размещать целые измерительные комплексы, они могут длительное время находиться в заданном районе или дрейфовать. Достоинствами таких буй-лабораторий являются их хорошая пространственная стабилизация, относительно высокая устойчивость, что позволяет обеспечивать океанологические измерения в заданной точке и ориентации.

## 16.5. Стационарные и передвижные платформы для океанологических исследований

Основным техническим средством в океанологии в настоящее время и в обозримом будущем являются НИС. Но при проведении «тонких» гидрофизических экспериментов в море, требующих жесткой ориентации измерителей в пространстве, классические средства (НИС, АВС и т. д.) подвержены воздействию ветра, волнения и тече-

ния, что вносит значительные погрешности в измерения. Для исключения подобных «паразитных» воздействий в океанологической практике нашли применение стационарные и передвижные, в том числе полупогруженные, платформы, которые можно устанавливать на больших глубинах. Особенно широко эти платформы используются при изучении мелкомасштабных процессов в океане, а также при длительных непрерывных гидрофизических и гидрометеорологических исследованиях на значительном удалении от берега. Так, в 1964 г. на Каспийском море в 100 км от берега была установлена автономная передвижная гидрометеорологическая станция АПС-1 на свайном основании. С помощью системы измерителей различной конструкции на ней проводят наблюдения за течениями, волнением, уровнем и т. п. Подобные типы установок используются на Азовском и Черном морях.

Платформа для океанологических исследований установлена на Черном море в филиале Морского гидрофизического института в пос. Кацивели и используется для проведения «тонких» экспериментальных гидрофизических исследований.

В качестве исследовательских платформ в последнее время стали использоваться нефтяные вышки различных конструкций, установленные в разных районах Мирового океана. Широкое применение нашли так называемые шарнирные платформы, опирающиеся своей нижней оконечностью (достаточно тяжелой) на дно. В верхней части платформы сосредоточены плавучести, что и дает платформе устойчивость. Платформы могут устанавливаться на глубинах до 300 м со значительно меньшей трудоемкостью, чем все остальные.

## 16.6. Подводные аппараты

В настоящее время во всем мире создано большое число разнообразных подводных аппаратов. Они различны по конструкции и предназначены в основном для решения конкретных задач, связанных с рыболовством, геологией моря, прокладкой труб по дну, бурением и т. д. Сейчас не существует твердо установленной и общепринятой классификации подводных аппаратов, но условно их можно разделить следующим образом:

- обитаемые (с человеком на борту) и необитаемые или автоматы с дистанционным управлением;
- привязные (поддерживаемые тросом — гидростаты, батисферы), беспоплавковые (поддерживаемые плавучестью прочного корпуса), поплавковые — батискафы, донные — передвигающиеся по дну;
- транспортируемые (доставляемые судном в район исследований и буксируемые на тросе), автономные (доставляемые судном и самостоятельно перемещающиеся после спуска на воду), полностью автономные.

*Обитаемые подводные аппараты (ОПА).* Первенцами из всего многообразия ОПА являются привязные аппараты, имеющие ряд

важных достоинств. Через кабель-трос, поддерживающий аппарат в толще воды, подается энергия и осуществляется связь. Экономия в весе и полезной площади из-за отсутствия энергетической установки позволяет оснащать эти ОПА большим комплексом исследовательской аппаратуры, увеличить автономность работы и численность экипажа. К недостаткам таких ОПА относятся малая глубина погружения, отсутствие автономности, сложность операций подъема и спуска из-за кабель-троса и плангов. В настоящее время имеется уже более 200 ОПА, используемых в разных областях. Значительная часть ОПА («Мир», Россия; «Алвин», «Динстар-4000», США; «Архимед», Франция, и т. д.) применяются в качестве научно-исследовательских. Ряд ОПА («Пайсис», Канада, и др.) используются для поиска и подъема экспериментальных образцов торпедного оружия, обследования кабельных линий и нефтяных разведочных буровых, а также для аварийно-спасательных работ (например, ДСРВ, «Динквест», США).

Большинство ОПА имеют глубину погружения до 600 м. Некоторые могут работать на глубине до 2000 м: «Пайсис» (Канада), «Динстар», «Динквест» (США). На глубинах свыше 2000 м могут работать «Мир» (Россия), «Алломинаут», «Алвин» (США), «Сиана» (Франция), а также батискафы ФНРС, «Архимед» (Франция), «Триест» (США).

Обитаемые подводные аппараты имеют два корпуса: прочный и легкий; снабжены системой переменного балласта, крено-дифференциальной системой, движительным комплексом, системой управления движением, системой манипулирования, энергетическими установками, системой наблюдения и освещения, системой жизнеобеспечения экипажа, системой навигации и связи.

*Прочный корпус ОПА*, герметизированный от внешней среды, служит для размещения экипажа, систем информации и управления. В последнее время появились ОПА с водолазными отсеками. На заданной глубине отсек разгерметизируется, и водолазы в специальном снаряжении могут длительное время работать за бортом. После окончания работ отсек герметизируется, а при подъеме на борт судна водолазный отсек стыкуется с судовой гипербарической камерой. Рабочая глубина активных действий водолазов в подобных аппаратах («Джонсон Са Линк», «Дин Дайвер», США; «Моана», Франция) обычно ограничивается 300 м.

*Система переменного балласта* необходима для изменения плавучести ОПА при его погружении и всплытии; как правило, используют системы жидкого и твердого балласта.

*Крено-дифференциальная система* применяется для выравнивания ОПА на ходу или при посадке на грунт, а также при дифференце для ускорения погружения или всплытия аппарата. Принцип действия системы, представляющей расположенные на периферии ОПА прочные цистерны, заключается в перекачивании между ними рабочего тела, чаще всего воды.

*Движительный комплекс* обеспечивает высокую маневренность ОПА, резкое изменение траектории и скорости движения во всех

направлениях. Движители в виде средств активного управления сочетают движительные функции с функцией управления. Как правило, в качестве движителей используются поворотные колонки с винтом в насадке.

*Энергетические установки* состоят из аккумуляторных батарей, топливных элементов и даже атомных энергетических установок.

*Система наблюдения и освещения* — наружные светильники на жестких или подвижных опорах; используется для проведения подводных работ в нормальных условиях. В качестве источника света используют различные лампы накаливания.

*Необитаемые подводные аппараты (НПА)* предназначены для исследования океана, выполнения сравнительно несложных работ в его глубинах и различаются прежде всего по глубине погружения. Здесь они делятся на три группы: рассчитанные на малые (до 600 м), средние (до 2000 м) и большие (свыше 2000 м) глубины погружения, что определяет конструкцию, степень сложности аппаратуры управления и конечные возможности аппаратов.

Наибольшее число НПА, представляющих собой простые системы для выполнения ограниченных функций, принадлежит к первой группе. Это КЭРВ-I, КЭРВ-II, «Ветфиш», УАРС, РУФАС (США), «Теленот-I» (Франция), «Скат» (Россия), «Глория» (Англия), «Пингвин» (Германия) и т. д. Ко второй, меньшей по составу, группе НПА относятся более совершенные аппараты с большими функциональными возможностями. Это КЭРВ-III, ВОРКСАВ, «Айда» (США), «Теленот-II», «Эрик-I», «Тройка» (Франция), «Манта-1,5», «Краб» (Россия). К третьей группе аппаратов (до 6000 м) относятся: РУВС, МПЛ, СПУРВ, «Си проуб», НРЛ (США), «Эрик-II» (Франция).

По функциональному признаку НПА можно разделить на автономные (АНПА) и привязные (ПНПА). Большую группу составляют ПНПА, с помощью которых удается выполнять длительные измерения параметров среды на заданных глубинах, картографирование дна и поиск затонувших объектов. Такие системы обычно буксируются на кабель-трассе, который одновременно служит энергопитающим и информационным каналом. Кроме того, эти аппараты имеют собственные средства движения, позволяющие им, например, осуществлять маневрирование над дном или объектом работ.

Автономные необитаемые подводные аппараты предназначены для исследований по заранее заданной программе. Они могут работать в толще воды, непосредственно у дна, в режиме вертикального зондирования или в режиме пространственного зондирования, когда спуск и подъем происходят, например, по спирали. При этом программа может включать следующие виды работ: исследование нижней крошки льда (ARCS, Канада; UARS и UNJNOW, США); поиск и идентификацию объектов (AUSS, UFSS, США); изучение механического сопротивления движению (AUV, B-I, США); изучение управляемости подводных аппаратов (CSTV, LSV, США); обследование конструкций (EAVE, EAST, Англия; EAVE WEST, ROVER, США; TM-808, Италия; ELYT, Франция); донную топографию и фотографирование (EPAULARD, Франция); обследование дна (Robot-II, США); противо-

минные действия (RUMJС, США; РАР-104, Франция); исследования в толще воды (SPURV I, II, США); разрушение конструкций (TELEMJNE, Франция); сбор железомарганцевых конкреций (PLAZ-6000, Франция). Связь АНПА с судном-базой обычно осуществляется по гидроакустическому каналу.

Чаще всего АНПА имеют винтовые двигатели. Управление по курсу и дифференту производится с помощью гидродинамических рулей или подруливающих устройств. Погружение аппаратов производится за счет подвешивания дополнительного груза, часть которого сбрасывается при достижении необходимого горизонта, а в рабочем режиме сохраняется небольшая положительная плавучесть. Удержание на заданном горизонте регулируется подруливающими устройствами, а иногда гайдропами. В некоторых аппаратах используются балластно-дифференциальные системы.

## 16.7. Неконтактные технические средства проведения океанологических исследований

В последнее время большое значение при исследовании Мирового океана приобретают неконтактные средства, использование которых основано на получении данных излученного или отраженного океанологическими объектами электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. При этом неконтактная измерительная аппаратура (т. е. аппаратура, не имеющая непосредственного контакта с исследуемой средой) может быть установлена не только на борту НИС, но и, чаще всего, на борту как авиационных, так и космических носителей.

Характерными недостатками всей неконтактной измерительной аппаратуры являются косвенный характер измерения океанологических параметров и воздействие на результаты измерений многих неустраняемых помехообразующих факторов, что приводит к погрешностям измерений, как правило, превышающим погрешности измерений, выполненных с помощью контактной аппаратуры; к невозможности получить информацию о глубинных слоях океана (в настоящее время лишь до глубины 30—40 м), а также результаты измерений с приемлемой точностью.

К положительным качествам данных технических средств относятся: получение непрерывных пространственных реализаций полей океанологических характеристик; освещение больших акваторий за ограниченный промежуток времени; регулярное освещение всей акватории Мирового океана с временной дискретностью 2—3 ч в течение весьма длительных промежутков времени (годы и даже десятилетия) (особенно с помощью космических систем); получение массовых данных о таких океанологических явлениях и характеристиках, которые невозможно получить контактными методами, например о глобальном распределении ледяного покрова и толщине льда; отсутствие влияния при производстве наблюдений штормовых условий.

Сопоставляя различные технические средства для проведения океанологических исследований с учетом мореходности, скорости хода, управляемости, автономности, дальности плавания, способности ведения синхронных исследований, комплексности использования и других важных показателей — предпочтение следует отдать НИС. Научно-исследовательские суда в настоящее время остаются главным, наиболее экономичным и освоённым методом выполнения различных океанографических работ на больших акваториях. Это объясняется тем, что за последнее время класс НИС значительно усовершенствован, неизмеримо повысились исследовательские возможности новых научных судов. Но следует подчеркнуть, что отдельные технические средства исследований океана не являются конкурентами, а их использование в первую очередь зависит от возлагаемых на них задач, состава измерительной аппаратуры, скорости и других тактико-технических данных.

Все технические средства представляют хорошо сбалансированную систему, предназначенную для всестороннего изучения океана. Каждое должно иметь четкую область применения, т. е. даже НИС следует рассматривать как часть, пусть и основную, этой системы. В будущем, в связи с развитием науки и техники, возможна передача некоторых функций от судовых средств к другим, например дистанционным или АВС, но в любом случае все это будет происходить при дальнейшем углублении комплексности исследований.



## Глава 17

### СУДОВЫЕ СРОЧНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

#### 17.1. Судовые гидрометеостанции

Для выполнения срочных гидрометеорологических наблюдений в море на судах организуются гидрометеостанции, задачами которых являются:

— производство стандартных гидрометеорологических наблюдений на морях и океанах с целью: а) немедленной передачи по радио результатов наблюдений в органы службы прогнозов; б) увеличения фонда гидрометеорологических наблюдений для обобщения их при составлении атласов, справочников, карт, описаний и проведения исследований климата, погоды и гидрологического режима морей и океанов;

— снабжение оперативной информацией о фактическом состоянии погоды и моря в районах плавания, передача гидрометеорологических прогнозов (составление прогнозов, если в штат станции входят синоптики) и консультации по гидрометеорологическим вопросам;

— производство специальных гидрометеорологических наблюдений и работ в целях научных исследований, испытания новых методов и приборов.

В зависимости от поставленных задач, состава, объема наблюдений и работ судовые гидрометеостанции делятся на три разряда. Станции 1-го разряда осуществляют полный комплекс стандартных гидрометеорологических наблюдений в основные (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч по СГВ) и дополнительные сроки; ведут аэрологические, актинометрические и другие наблюдения; оперативно обслуживают гидрометеорологическими прогнозами; обеспечивают регулярную гидрометеорологическую информацию и обработку материалов своих наблюдений. Станции 2-го разряда обычно выполняют полный комплекс стандартных гидрометеорологических наблюдений, но 4 раза в сутки (в 0, 6, 12 и 18 ч по СГВ). Станции 3-го разряда выполняют стандартные гидрометеорологические наблюдения по сокращенной программе 4 раза в сутки и обслуживаются штурманским составом судов.

Для каждой судовой гидрометеостанции 1-го разряда устанавливается индивидуальная программа наблюдений и работ. Для станций 2-го разряда устанавливаются, как правило, типовые программы. Каждая индивидуальная программа обязательно должна содержать комплекс стандартных гидрометеорологических наблюдений и некоторые специальные виды наблюдений.

К стандартным гидрометеорологическим наблюдениям относятся:

1) наблюдения за облачностью: а) общее количество облаков; б) количество облаков верхнего или среднего ярусов; в) формы облаков; г) высота основания верхнего или среднего ярусов;

2) наблюдения за видимостью;

3) наблюдения за атмосферными явлениями, текущей (ww) и прошедшей погодой (W);

4) наблюдения за скоростью и направлением ветра;

5) наблюдения за температурой и влажностью воздуха;

6) наблюдения за температурой поверхностного слоя воды;

7) наблюдения за атмосферным давлением: а) значение давления; б) характеристика барической тенденции; в) значение барической тенденции;

8) наблюдения за волнением моря: а) тип волнения; б) форма волнения; в) направление распространения волн; г) высота наиболее крупных волн; д) средний период волн; е) длина волн и длина гребней волн; ж) балл состояния поверхности моря;

9) наблюдения за ледяным покровом: а) плотность плавучего льда; б) сплошность неподвижного и подвижного льда; в) толщина льда; г) возрастные характеристики и формы льда; д) условия плавания судов во льду; е) направление, в котором видна кромка льда; ж) расстояние от судна до кромки льда; з) ориентация кромки льда; и) торосистость, заснеженность и другие характеристики льда; к) число айсбергов, их положение, размеры и другие характеристики; л) дрейф льда (скорость и направление);

10) наблюдения за опасными гидрометеорологическими явлениями и явлениями, имеющими важное значение (например, шторм);

11) наблюдения за свечением моря;

12) наблюдения за цветом и прозрачностью морской воды;

13) фотографирование наиболее интересных гидрометеорологических явлений (формы облаков, виды, формы и распределение льдов, волнение и т. п.);

14) обработка результатов наблюдений, лент самописцев, составление таблиц;

15) кодирование результатов наблюдений и обеспечение их своевременной передачи.

К специальным наблюдениям относятся: аэрологические, актинометрические, дополнительные метеорологические, дополнительные ледовые, радиометрические (радиологические), озонметрические, синоптические.

При проведении наблюдений необходимо точно и четко записывать время и место их выполнения. Время наблюдений записывают в целых часах по СГВ. Координаты места записывают с точностью до 1', с обозначением методики определения места (счисление или обсервация).

Любое судно является источником всякого рода нарушений естественного состояния атмосферы и гидросферы вокруг себя. Оно излучает и поглощает тепло, загрязняет атмосферу дымом, искажает поток воздуха своим корпусом, перемешивает верхний слой и при-

легающий к нему воздух, нарушает естественную поверхность воды, покрывая ее пеной, и т. д. Задача же гидрометеорологических наблюдений — определять естественное состояние гидросферы и атмосферы и процессов, происходящих в них, не искаженных влиянием судна. Поэтому гидрометеорологические наблюдения на судне нужно производить в таких местах, где искажающее влияние судна было бы минимальным. Для большинства визуальных и некоторых инструментальных наблюдений таким местом обычно является верхний мостик — на нем нет надстроек, мешающих наблюдениям, и горизонт открыт по всем направлениям. Метеорологические приборы должны располагаться на значительном расстоянии от бортов судна, палубы, переборок, вдали от вытяжных и дымовых труб и т. п. Приборы не должны забрызгиваться морской водой. Стандартные неавтоматизированные гидрометнаблюдения выполняют следующим образом. За 25—30 мин до очередного срока наблюдений наблюдатель на верхнем мостике с наветренной стороны вешает аспирационный психрометр, измеряет скорость ветра ручным анемометром, определяет по компасу направление ветра и волнения, производит визуальные наблюдения за облачностью, атмосферными явлениями, видимостью и волнением моря, смачивает батист психрометра и заводит аспиратор, получает в штурманской рубке и записывает сведения о курсе, скорости и местонахождении (координаты) судна, снимает отчет с барометра-анероида и делает засечки на лентах самописцев, производит отчет показаний психрометра, измеряет температуру воды, производит ледовые наблюдения, обрабатывает результаты измерений, составляет и отправляет радиограмму. Смена лент самописцев производится в срок, приходящийся на середину дня.

## 17.2. Методика производства наблюдений

Остановимся на основных видах судовых гидрометнаблюдений, еще не описанных в этой работе.

*Наблюдения за облачностью* включают определение количества, формы облаков и высоты их нижней границы.

Количество облаков, т. е. степень покрытия облаками небосвода (общая облачность), и количество облаков нижнего яруса (нижняя облачность) выражаются в баллах по 11-балльной шкале от 0 до 10 баллов. С этой целью на глаз оценивается, на сколько десятых долей небо покрыто облаками. При отсутствии облаков или если они закрывают менее 0,05 части неба, облачность оценивается баллом 0, если небо полностью покрыто облаками — 10 баллов, если имеются незначительные просветы — записывается 10.

Форму облаков (форма, виды и разновидности) и наличие солнечного или лунного сияния в момент наблюдения записывают сокращенно латинскими буквами, определяют, по возможности, формы облаков всех классов по международной классификации — облака нижнего, среднего, верхнего ярусов и облака вертикального развития.

Пособием для определения форм облачности может служить «Атлас облаков». При этом всегда надо отмечать наличие и интенсивность солнечного и лунного сияния.

Высота нижней границы облаков оценивается приблизительно, на глаз, следует стремиться к точности 50—200 м, а в самом худшем случае до 500 м.

*Наблюдения за видимостью.* Метеорологической видимостью называется то наибольшее расстояние, дальше которого при данной прозрачности атмосферы абсолютно черный предмет больших угловых размеров, проектирующийся на фоне неба вблизи горизонта, сливается с фоном и вследствие этого становится невидимым. Задача наблюдателя — определять, записывать и включать в синоптическую радиограмму в каждый срок наблюдений дальность метеорологической видимости. В море определение метеорологической видимости днем производится визуально, а ночью — с помощью измерителя видимости М-71 или визуально. Дальность видимости оценивается по международной 10-балльной шкале от 0 до 9 баллов. Каждый балл этой шкалы обозначает интервал, в пределах которого в момент наблюдений лежит дальность видимости. Например, при видимости 6 баллов видны объекты, расположенные на расстоянии более 4 км, но менее 10 км.

Объектами для определения видимости в море служат появляющиеся на горизонте плавающие суда, очертания берегов, гор, лесов и строений на берегу; ночью — огни маяков и плавающих судов. При отсутствии каких-либо объектов видимость определяется по четкости линий горизонта. Ночью же при неизменности атмосферных явлений видимость можно принимать по предыдущему сроку, а в случае появления новых атмосферных явлений (туман, морось и т. д.) — принимать во внимание интенсивность этого явления и определять ее с помощью соответствующих таблиц, имеющихся в наставлениях и руководствах.

*Наблюдения за атмосферными явлениями* (осадки, туманы, грозы и различные оптические, электрические и другие явления, происходящие в атмосфере), а также за состоянием погоды в срок и между сроками наблюдений выполняются круглосуточно и записываются в книжки наблюдений цифрами кода по КН-01С или соответствующими условными обозначениями. Необходимо отмечать явления, происходящие не только в месте нахождения судна, но и в поле зрения.

*Наблюдения за скоростью и направлением ветра* среди всех явлений погоды в море по своей важности занимают первое место. От силы и продолжительности ветра зависят размеры волн в открытом море, ветер создает различные течения и оказывает значительное влияние на ход судна.

Основная задача наблюдателя на судне — определить истинное направление ветра (откуда дует ветер) и истинную скорость ветра над морем. Для измерения скорости ветра обычно используют ручной анемометр, работа с которым, как правило, производится на наветренном крыле верхнего мостика судна, или различного типа автоматические измерители.

При использовании ручного анемометра, который дает среднюю скорость ветра в м/с, направление ветра определяют по компасу с помощью «колдунчика» (мешочек, сшитый из легкой ткани в виде сильно вытянутого конуса), вытягивающегося вымпела, флага на мачте, дыма из трубы и т. п., сообразуясь с направлением «вытягивания» подручных средств. Затем, вводя в полученное направление поправку компаса (на склонение и девиацию), получают истинное направление ветра, которое и записывают в книжку наблюдений в десятках градусов.

Некоторую сложность представляет определение истинных скорости и направления ветра на ходу судна, так как в этом случае наблюдатель измеряет кажущийся ветер, ибо на результаты измерений значительное влияние оказывает движение самого судна. Истинные направление и скорость ветра над морем на движущемся судне определяют с использованием правила параллелограмма скоростей. Эти определения производятся графически или с помощью несложного устройства — ветрочета КСМО-1М — с учетом скорости и направления движения судна.

При отсутствии на судне анемометра силу истинного ветра можно определить на глаз: по ощущению, дыму, флагу, по воздействию ветра на водную поверхность и т. д. В этом случае ее выражают в баллах по шкале Бофорта, которые можно перевести в м/с.

В настоящее время существует большое число различных автоматических устройств для измерения характеристик ветра в судовых условиях. В качестве примера можно привести «Корабельный измеритель ветра» (КИВ), разработанный в ЦКБ ГМП, предназначенный для дистанционного определения скорости и направления ветра, измеренного на уровне установки датчика ветра. Для измерения скорости ветра используется зависимость между скоростью ветра и числом оборотов лопастного винта вертушки, а для определения направления — зависимость между направлением ветра и положением свободно ориентированной флюгарки датчика ветра. Получаемая информация с помощью сельсинной передачи по кабелю подается на пульт — центральный прибор, в котором происходит осреднение значений скорости ветра с помощью программно-наборного механизма и сглаживание значений направления ветра демпфирующим устройством. Режим работы прибора — непрерывный с дискретной выдачей данных средней скорости наблюдаемого ветра через каждые 120 с.

Диапазон измерений скорости ветра 2—40 м/с, направления ветра 0—360°. Абсолютная погрешность измерения: средней скорости ветра  $\pm(0,3+0,03 V)$ , где  $V$  — скорость наблюдаемого ветра; направления ветра  $\pm 10^\circ$ . Абсолютная погрешность установки и снятия отсчетов на построителе: скорости ветра  $\pm 0,2$  м/с; направления ветра  $\pm 0,3^\circ$ . Масса всего комплекса 53 кг (датчик ветра 3,5 кг, центральный прибор 16 кг, репитер 3,5 кг, трансформатор 5,8 кг, построитель 2 кг). Габаритные размеры: датчика ветра 360×640 мм, центрального прибора 418×296×190 мм, репитера 253×174×129 мм, трансформатора 306×178×172 мм, построителя 250×278×65 мм.

*Наблюдения за температурой и влажностью воздуха* производятся обычно аспирационным психрометром (большая модель), который выносятся с палубы судна за наветренный борт. Прибор должен быть защищен от солнечных лучей, теплового воздействия палубы и корпуса судна, от атмосферных осадков и забрызгивания морской водой. По отсчетам сухого и смоченного термометров психрометра (они снимаются с точностью до  $0,1^{\circ}\text{C}$ ), используя «Психрометрические таблицы», определяют абсолютную влажность (количество или парциальное давление водяного пара, содержащегося в атмосфере в момент наблюдений, мм ртутного столба или гПа), относительную влажность (отношение имеющегося в атмосфере количества водяного пара к количеству водяного пара, которое требуется при данной температуре для насыщения атмосферы, %) и точку росы (температура, при которой имеющееся в данный момент в воздухе количество водяного пара было бы достаточным для полного его насыщения).

*Наблюдения за атмосферным давлением на судах* осуществляются с помощью барометра-анероида. По значению наблюдаемого давления, по его суточному ходу (ход изменения атмосферного давления за сутки) можно предсказать усиление или ослабление ветра, появление или исчезновение облачности, выпадение или прекращение осадков и другие изменения погоды в районе нахождения судна. После снятия отчетов в показания барометра-анероида необходимо ввести соответствующие поправки:

1) температурную поправку, которая дается в паспорте прибора, а температура самого прибора во время измерения снимается с дугообразного термометра, встроенного в барометр, или с термометра, расположенного на барометр сверху;

2) добавочную поправку, вызванную погрешностями самого механизма барометра. Так как срабатываемость различных деталей механизма прибора меняется со временем, то и добавочная поправка не остается постоянной, поэтому барометр-анероид необходимо регулярно проверять;

3) шкаловую поправку, которая дается в паспорте прибора. Обычно она незначительна и не изменяется со временем;

4) поправку на приведение показаний барометра к уровню моря. Приведение давления к уровню моря достигается простым прибавлением к исправленному отсчету  $0,1$  мм рт. ст. на каждый метр возвышения барометра-анероида над уровнем моря, для чего всегда необходимо знать это превышение.

Для непрерывной регистрации всех изменений атмосферного давления служат барографы, которые могут быть с суточным или недельным заводом. С помощью барографов определяют также характеристику барической тенденции, под которой понимают форму кривой, начерченной пером барографа за последние 3 ч до срока наблюдений. Значение барической тенденции — изменение атмосферного давления за последние 3 ч до срока наблюдений — при регулярном производстве наблюдений лучше определять по барометру.

*Наблюдения за свечением моря* производятся в темное время суток в наиболее затемненной части судна над участками моря, на которые не падает свет от судового освещения и Луны. Во многих районах Мирового океана ночью замечается свечение морской воды, обычно наиболее заметное при всплесках и разбрызгивании воды на гребнях волн, при прохождении судна и т. д. Излучение света морской водой вызывается наличием в ней светящихся морских живых организмов, в основном бактерий. Эти организмы начинают испускать свет обычно при всяком внешнем раздражении. Свечение моря тем ярче, чем больше находится в воде светящихся организмов, чем сильнее получаемое ими раздражение и чем темнее ночь.

Различают три типа свечения моря:

1) искрающееся, увеличивающееся при различных механических возмущениях моря; это наиболее распространенный тип;

2) молочное и раалитое свечение, охватывающее одновременно значительные участки поверхности моря, достигающее иногда большой яркости; не усиливается от механического возмущения воды, но не бывает продолжительным;

3) свечение отдельных крупных организмов — рыб, медуз, гребневиков и др.

Может также наблюдаться сочетание двух или даже трех названных типов свечения.

Таким образом, мы рассмотрели основные виды срочных судовых гидрометнаблюдений, за исключением наблюдений за температурой поверхностного слоя воды, волнением и ледяным покровом, методика наблюдений за которыми уже ранее описана в данной работе. Запись результатов наблюдений производится в книжках КГМ-15А (если измерения проводились штатными наблюдателями) и КГМ-15 (если измерения проводились штурманским составом судна). Сразу же после наблюдений в основные синоптические сроки составляется синоптическая метеорадиограмма для передачи в органы службы прогнозов. Данные, включаемые в радиограмму, кодируются цифрами по коду КН-01С.

Кроме стандартных наблюдений на судах иногда ведутся наблюдения по индивидуальным программам. К ним относятся:

- актинометрические наблюдения;
- непрерывная регистрация температуры и влажности воздуха самописцами и наблюдения за экстремальными температурами воздуха по максимальному и минимальному термометрам;
- наблюдения за количеством осадков;
- наблюдения за порывистостью ветра;
- наблюдения за движением облаков;
- наблюдения за общим содержанием атмосферного озона;
- градиентные наблюдения за скоростью ветра, температурой и влажностью воздуха;
- наблюдения за атмосферным электричеством;
- отбор проб осадков для их химического исследования;
- испытание новых метеорологических приборов в морских условиях и т. п.

Одним из основных видов специальных наблюдений являются актинометрические. Большая часть земной поверхности покрыта водой, поэтому для познания процессов и явлений, происходящих в атмосфере, водах морей и океанов, для расчета теплового баланса необходимо знать, какое количество солнечной энергии поступает на водные поверхности. При выполнении морских актинометрических измерений в настоящее время используются актинометрические приборы, предназначенные для сухопутных условий. Эти приборы на судне необходимо разместить и приспособить так, чтобы факторы, вносящие ошибки в результаты измерений (качка, вибрация), были по возможности исключены или в достаточной степени уменьшены. Для этой цели приборы чаще всего размещают в кардановом подвесе. На судах производят следующие виды актинометрических измерений:

- измерение прямой солнечной радиации ( $S$ ) на водную поверхность, выполняют актинометром;

- измерение суммарной радиации ( $Q$ ), выполняют пиранометром;

- измерение отраженной коротковолновой радиации ( $R_k$ ), выполняют с помощью альбедометра;

- измерение радиационного баланса, выполняют балансомером.

Рассеянная радиация вычисляется по формуле  $D = Q - S$ .

Устройство актинометрических приборов приведено в учебниках и монографиях по метеорологическим приборам. Все актинометрические наблюдения производятся 8 раз в сутки ( $0^{\text{h}}$ ,  $3^{\text{h}}$ ,  $6^{\text{h}}$ ,  $9^{\text{h}}$ ,  $12^{\text{h}}$ ,  $15^{\text{h}}$ ,  $18^{\text{h}}$  и  $21^{\text{h}}$ ) по среднему гринвическому времени. Для записи наблюдений используются книжки КМ-12.

Наблюдения за экстремальными температурами, за количеством осадков, регистрацию температуры и влажности воздуха самописцами и некоторые виды дополнительных метеорологических наблюдений, несмотря на то что временами при сильной качке судна результаты их будут получаться искаженными или приборы не будут срабатывать, целесообразно включать в программу работ судовой гидрометстанции как постоянные. Другие виды дополнительных наблюдений могут включаться на один или несколько рейсов судна, т. е. на определенный срок, а также в опытный порядок.



# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## Основная

1. Дерюгин К. К., Степанюк И. А. Морская гидрометрия. — Л.: Гидрометеонадат, 1974. — 892 с.
2. Коровин В. П., Чеертин Е. И. Морская гидрометрия. — Л.: Гидрометеонадат, 1988. — 264 с.
3. Коровин В. П. Варужежные технические средства в океанологии. — СПб: РГГМИ, 1994. — 196 с.
4. Коровин В. П. История океанографических исследований. — СПб: Гидрометеонадат, 1999. — 156 с.
5. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. — Л.: Гидрометеонадат, 1977. — 555 с.

## Дополнительная

1. Багрянцев В. И. Измерение данных волн в открытом океане. — В кн.: Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана. — Владивосток, 1980, с. 11—17.
2. Балакин Р. А. и др. Опыт измерения уровня моря при помощи АЦИТ. — Метеорология и гидрология, 1982, № 8, с. 115—117.
3. Балажук В. А. и др. Комплекс первичных измерительных преобразователей для гидрофизических исследований. — В кн.: Физическая гидродинамика. Донецк, 1990, с. 123—127.
4. Вирюков Н. В. и др. Радиолокационный волномер-профилометр. — М., 1990. — 14 с.
5. Влейстен Н. Акустика океана. — М.: Мир, 1982. — 384 с.
6. Богданов К. Т. и др. Мареограф прибрежный МП-1. — Океанология, 1998, т. 3, № 1, с. 153—155.
7. Врховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. — Л.: Гидрометеонадат, 1982. — 264 с.
8. Бриллиантов А. И., Зарецкий А. В. Обзор автономных необитаемых подводных аппаратов. — В кн.: Подводные технические средства исследования океана. М., 1988, с. 49—54.
9. Бушуев А. В., Волков Н. А., Грищенко В. Д. Наблюдения за морскими льдами и их исследование, создание автоматизированной ледово-информационной системы. — Проблемы Арктики и Антарктики, 1995, № 70, с. 104—119.
10. Гостев О. Ф., Трубкин И. П., Чикаладзе Г. Н. Автономный волноизмерительный буй. — Тр. ГОИН, 1988, вып. 184, с. 15—22.
11. Деорников Г. Д., Шишкин И. Ф. Измерение параметров волнения водной поверхности с помощью лазера. — В кн.: Исследования в области гидрофизических измерений. — Л.: Энергоиздат, 1982.
12. Зори А. А. Автоматизация контактных методов зондирования океана. — Владивосток, 1991. — 256 с.
13. Зотин М. И. Современные методы и приборы измерения уровня моря. — Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД, 1982. — 40 с.
14. Иванов А. П. Приборы для исследования первичных гидрооптических характеристик. — Минск, 1981. — 82 с.

15. Ильных Ю. С. и др. Прецизионный гидрологический зонд для океанологических исследований. — Измерительная техника, 1995, № 8, с. 89—42.
16. Инженерно-гидрометрические изыскания на континентальном шельфе. — М.: Гидрометеоиздат, 1993. — 377 с.
17. Клей К. С., Медвин Г. Акустическая океанография. Основы и применения. — М.: Мир, 1980.
18. Ковчин И. С. Автономные океанографические средства измерений. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 826 с.
19. Коровин В. П. Технические средства и организация промысла. — Л.: ЛГМИ, 1988. — 88 с.
20. Кушнир В. М. Зонд для вертикального профилирования течений и гидрологических элементов. — Океанология, 1994, т. 34, № 2, с. 308—305.
21. Левашов Д. Е. и др. Современная океанологическая аппаратура для рыбопромысловых исследований. — Рыбное хозяйство, 1997, № 1, с. 23—29.
22. Маркин В. Отечественный флот науки. — Голос Арктики, 1996, № 11, с. 88—87.
23. Матушевский Г. В. Современные методы измерения ветровых волн. — Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД, 1982. — 30 с.
24. Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость Мирового океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 262 с.
25. Нелепо Б. А., Смирнов Г. В., Шадрин А. Б. Интегрированные системы для гидрофизических исследований. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — 237 с.
26. Пятелев В. Л. Основы морской гравиметрии. — М.: Недра, 1983. — 256 с.
27. Парамонов Л. Н., Кушнир В. М., Заикин В. М. Автоматизация гидрофизического эксперимента. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 224 с.
28. Песенюк Л. П., Пешехонов В. Г., Элинсон Л. С. Морские гравиметрические комплексы. — Судостроение, 1994, № 4, с. 29—30.
29. Смирнов Г. В., Кухарчик А. В. Буксируемые, зондирующие и автономные информационно-измерительные комплексы океанографических параметров модульной конструкции. — Севастополь, 1986. — 42 с.
30. Смирнов Г. В. Первичные измерительные преобразователи океанографических параметров. — Владивосток, 1991. — 205 с.
31. Смирнов Г. В., Спиридонов В. В. Аппаратура для измерения гидрооптических характеристик. — Владивосток: Дальнаука, 1994. — 272 с.
32. Степанюк И. А. Океанологические измерительные преобразователи. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 272 с.
33. Трохан А. М. Гидрофизические измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 335 с.
34. Фомин Л. М., Кушнир В. М., Титов В. В. Измерение океанских течений. — М.: Наука, 1989. — 396 с.
35. Bratnard Edwards. Progress report on the ENDECO free foll. — «Oceans» 87. Proc.: Ocean Int. Workplace, Halifax, Sept. 28 — Oct. 1, 1987. Vol. 1; New York, 1987, p. 290—296.
36. Brown J., Brander K., Fernand L., Hill A. E. Skanfish: High performance towed undulator. — Sea Technol., 1996, vol. 37, N 9, p. 23—29.
37. Clarke R. A., Dessureault J., Lebaus G. Upper-ocean profiling from vessels underway. — Sea Technol., 1995, vol. 36, N 2, p. 35—40.
38. De Strobel F., Gualdes L. High resolution towed oscillating system. — Sea Technol., 1994, vol. 35, N 7, p. 37—40.
39. Fisher Frederick H. FLIP II//IEEE J. Ocean. Eng., 1983, vol. 13, N 4, p. 174—185.
40. Kery S. Recent developments in instruments bottom mountings. — Sea Technol., 1996, vol. 37, N 6, p. 74—80.
41. McCoyh. Autonomies profiling vehicles. — Sea Technol., 1996, vol. 37, N 2, p. 15—18.
42. Sheets Herman E. Buoy technology meds. — Mariner Technol. Soc. J., 1974, vol. 8, N 1, p. 17—25.

Учебное издание

Владимир Петрович Коровин  
Валерий Михайлович Тимец

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Редактор О. Д. Рейнхверц. Художественный редактор Л. А. Унрод.  
Технический редактор Н. Ф. Грачева. Корректор Е. А. Ежова.

ЛР № 020228 от 10.11.96 г.

Подписано в печать 13.11.00. Формат 60 × 90 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Печ. л. 19,5. Кр.-отт. 19,5. Уч.-изд. л. 22,08. Тираж 1000 экз. Индекс МОЛ-1. Гидрометеонадат. 199897, Санкт-Петербург, В. О., ул. Беринга, д. 38.

