

**Е.Ю. Бутырский**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ГИДРОАКУСТИКИ  
И АКУСТИКИ ОКЕАНА**

Санкт-Петербург

2022

УДК 681.883

Бутырский Е.Ю. Теоретические основы гидроакустики и акустика океана: учебное пособие. – СПб.: Стратегия будущего, 2022. – 738 с.  
DOI: 10.37468/book\_171022

ISBN 978-5-4268-0053-3

Учебное пособие написано в соответствии с программой дисциплины «Теоретические основы гидроакустики и акустики океана». В пособии рассмотрены характеристики акустической среды, математические модели распространения акустических волн в океане, методы решения волновых уравнений, основные физические явления, связанные с передачей акустической энергии на расстояния, виды распределения скорости звука и соответствующие им траектории акустических лучей, факторы фокусировки и аномалии. Большое внимание уделено принципам излучения и приема гидроакустических волн, характеристики первичного и вторичного гидроакустического поля, а также моделям шумов и помех в океане и распространение звука в статистически однородной среде. Особое внимание уделено определению дальности действия гидроакустических средств. Учебное пособие предназначено для курсантов радиотехнического факультета Военно-морского политехнического института, но может быть использовано курсантами и студентами вузов, специализирующимися по данному профилю, а также преподавателями и специалистами в области гидроакустики.

### *Рецензенты*

*Жабко А.П.* – заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории управления Санкт-Петербургского государственного университета.

*Ковтуненко Э.С.* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ВМПИ ВУНЦ ВМФ

*Чудаков О.Е.* – заслуженный работник высшего профессионального образования Российской Федерации доктор технических наук, профессор, начальник отдела ООО «Пассат».

ISBN 978-5-4268-0053-3

© Бутырский Е.Ю., 2022

---

---

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
|             | <b>ПРЕЛИСЛОВИЕ</b>   | <b>7</b>   |
|             | <b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ</b>   | <b>15</b>  |
|             | <b>ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ</b>   | <b>16</b>  |
|             | <b>ВВЕДЕНИЕ</b>  | <b>17</b>  |
| <b>В.1</b>  | <b>Общая характеристика учебной дисциплины, и задачи обучения</b>  | <b>17</b>  |
| <b>В.2</b>  | <b>Историческая справка</b>  | <b>19</b>  |
| <b>I</b>    | <b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОАКУСТИКИ</b>  | <b>24</b>  |
| <b>1</b>    | <b>ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОАКУСТИКИ. ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРЯ КАК НЕОДНОРОДНОЙ ЗВУКОПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ</b>          | <b>24</b>  |
| <b>1.1</b>  | <b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ</b>   | <b>24</b>  |
| 1.1.1       | Основные определения гидроакустического поля   | 24         |
| 1.1.2       | Понятие фронта волны и принцип Гюйгенса  | 32         |
| 1.1.3       | Явления рефракции и дифракции акустических волн  | 34         |
| 1.1.4       | Гармонические волны и их характеристики  | 38         |
| 1.1.5       | Определения и единицы измерения параметров акустического поля  | 42         |
| 1.1.6       | Относительные единицы измерения акустических характеристик   | 51         |
|             | Контрольные вопросы  | 56         |
| <b>1.2</b>  | <b>ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРЯ КАК НЕОДНОРОДНОЙ ЗВУКОПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ</b>  | <b>57</b>  |
| 1.2.1       | Акустические характеристики океанической среды   | 57         |
| 1.2.2       | Факторы, влияющие на температуру и соленость морской воды  | 73         |
| <b>1.3</b>  | <b>ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА В ОКЕАНЕ</b>  | <b>77</b>  |
| 1.3.1       | Поглощение акустических волн в воде  | 77         |
| 1.3.2       | Релаксационное поглощение звука  | 80         |
| 1.3.3       | Релаксационная теория поглощения Мандельштама-Леонтовича   | 87         |
| 1.3.4       | Поглощение звука в морской воде  | 95         |
| 1.3.5       | Рассеивание звука в море   | 96         |
| 1.3.6       | Количественные характеристики коэффициента затухания   | 103        |
| <b>1.4</b>  | <b>СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ВОДЕ</b>   | <b>115</b> |
| 1.4.1       | Зависимость скорости звука от гидрофизических параметров океана  | 115        |
| 1.4.2       | Понятие о ВРСЗ и его характеристиках   | 118        |
| 1.4.3       | Дисперсия скорости звука   | 124        |
| 1.4.4       | Контактные методы и средства определения скорости звука  | 125        |
| 1.4.5       | Дистанционные методы измерения скорости звука  | 127        |
|             | Контрольные вопросы  | 140        |
| <b>2</b>    | <b>ВОЛНОВОЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ, АНАЛИЗА И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОАКУСТИКИ</b> | <b>141</b> |
| <b>2.1.</b> | <b>МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ОКЕАНЕ</b>                               | <b>141</b> |
| 2.1.1       | Уравнения гидродинамики, лежащие в основе волнового уравнения  | 146        |
| 2.1.2       | Волновое уравнение. Потенциал колебательной скорости   | 156        |
| 2.1.3       | Волновое уравнение распространения звука в вязкой жидкости. Уравнение Стокса                               | 167        |
| 2.1.4       | Волновое уравнение для плоской волны   | 168        |
| 2.1.5       | Волновое уравнение для сферической волны   | 169        |
| 2.1.6       | Волновое уравнение для цилиндрической волны  | 171        |
| 2.1.7       | Уравнение Гельмгольца  | 172        |
| <b>2.2</b>  | <b>ТОЧНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ</b>   | <b>174</b> |
| 2.2.1       | Общие подходы к решению волновых уравнений   | 174        |
| 2.2.2       | Использование функции Грина для решения волнового уравнения  | 180        |
| 2.2.3       | Представление поля в виде нормальных волн  | 185        |
| 2.2.4       | Интегральное представление поля  | 191        |
| 2.2.5       | Метод Даламбера решения одномерного волнового уравнения  | 193        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 2.2.6      | Метод Фурье. Модель с разделяющимися переменными  | 198        |
| 2.2.7      | Решение волнового уравнение для сферической акустической волны  | 204        |
| <b>2.3</b> | <b>ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ</b>   | <b>207</b> |
| 2.3.1      | Метод Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна   | 208        |
| 2.3.2      | Метод лучевой акустики  | 211        |
| 2.3.3      | Метод параболического уравнения   | 225        |
| 2.3.4      | Лучевой инвариант. Адиабатическое приближение   | 229        |
| 2.3.5      | Сравнение волновой и лучевой теорий   | 230        |
| 2.3.6      | Быстрая полевая программа   | 238        |
| 2.3.7      | Принцип взаимности  | 240        |
|            | Контрольные вопросы   | 244        |
| <b>2.4</b> | <b>ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ В ПОЛЕ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ</b>  | <b>245</b> |
| 2.4.1      | Основной закон акустики. Закон Ома в акустике   | 245        |
| 2.4.2      | Гармонические плоские волны. Основные соотношения   | 251        |
| 2.4.3      | Интенсивность плоских волн. Вектор Умова  | 255        |
| 2.4.4.     | Плоские волны в поглощающей среде   | 258        |
| <b>2.5</b> | <b>ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ В ПОЛЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ</b>  | <b>260</b> |
| 2.5.1      | Простые сферические акустические волны  | 260        |
| 2.5.2      | Гармонические сферические волны. Основные соотношения   | 262        |
| 2.5.3      | Потенциал скоростей и давление точечного источника  | 269        |
| <b>2.6</b> | <b>ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ В ПОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ</b>   | <b>271</b> |
| 2.6.1      | Волновое уравнение для цилиндрических волн  | 271        |
| 2.6.2      | Цилиндрические волны в общем случае   | 278        |
|            | Контрольные вопросы   | 283        |
| <b>2.7</b> | <b>ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН</b>   | <b>284</b> |
| 2.7.1      | Наклонное падение плоской волны. Закон Снеллиуса  | 284        |
| 2.7.2      | Коэффициенты отражения и прохождения для нормального падения  | 288        |
| 2.7.3      | Коэффициенты отражения и прохождения для наклонного падения   | 291        |
| 2.7.4      | Условие прозрачности границы при наклонном падении  | 295        |
| 2.7.5      | Особенности отражения сферической волны   | 299        |
| 2.7.6      | Прохождение акустической волны через плоский слой   | 302        |
| <b>2.8</b> | <b>ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА НЕРОВНЫМИ ГРАНИЦАМИ</b>  | <b>308</b> |
| 2.8.1      | Влияние поверхности моря на структуру акустических полей  | 308        |
| 2.8.2      | Сила рассеяния. Параметр Рэлея  | 309        |
| 2.8.3      | Энергетические характеристики переизлученного поля  | 317        |
| 2.8.4      | Понятие об эффективном коэффициенте отражения   | 320        |
| 2.8.5      | Распространение и отражение волн при наличии потерь в среде   | 321        |
| 2.8.6      | Отражение плоской волны от среды с потерями   | 325        |
| <b>2.9</b> | <b>ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕИВАНИЕ ЗВУКА ПОВЕРХНОСТЬЮ И ДНОМ ОКЕАНА</b>   | <b>329</b> |
| 2.9.1      | Рассеивание звука поверхностью океана   | 329        |
| 2.9.2      | Отражение и рассеивание звука дном океана   | 335        |
|            | Контрольные вопросы   | 341        |
| <b>II</b>  | <b>АКУСТИКА ОКЕАНА</b>  | <b>342</b> |
| <b>3</b>   | <b>РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОМ ОКЕАНЕ. ОСНОВНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКЕАНЕ</b> | <b>342</b> |
| <b>3.1</b> | <b>ОСНОВНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКЕАНЕ. ТИПОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА</b>                | <b>342</b> |
| 3.1.1      | Основные гидроакустические явления в океане   | 342        |
| 3.1.2      | Приповерхностный звуковой канал   | 351        |
| 3.1.3      | Отрицательная рефракция. Антиволноводное распространение звука  | 368        |
| 3.1.4      | Распространение акустической энергии при наличии слоя скачка  | 371        |
| <b>3.2</b> | <b>РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ</b>  | <b>382</b> |
| 3.2.1      | Лучевая картина в ПЗК   | 384        |
| 3.2.2      | Скорость и время пробега акустических волн в звуковом канале  | 389        |
| 3.2.3      | Концентрация энергии в ПЗК  | 396        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>3.3</b> | <b>ДАЛЬНИЕ ЗОНЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ</b>  | <b>402</b> |
| 3.3.1      | Лучевая трактовка образования дальних зон акустической освещенности  | 402        |
| 3.3.2      | Распространение звука при ПЗК 1-го рода  | 408        |
| 3.3.3      | Распространение звука при ПЗК 2-го рода  | 413        |
| 3.3.4      | Оценка поля в ДЗАО   | 415        |
| 3.3.5      | Усредненный закон спада интенсивности звука в ПЗК на больших расстояниях   | 417        |
| 3.3.6      | Оценка поля в условиях зональной структуры   | 422        |
| <b>3.4</b> | <b>ТРАЕКТОРИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ЛУЧА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ СКОРОСТИ ЗВУКА</b>   | <b>425</b> |
| 3.4.1      | Кусочно-постоянная аппроксимация ВРСЗ  | 425        |
| 3.4.2      | Кусочно-линейная аппроксимации ВРСЗ  | 426        |
| 3.4.3      | Методика построения траекторий акустических лучей  | 428        |
|            | Контрольные вопросы  | 437        |
| <b>3.5</b> | <b>РЕФРАКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ФАКТОР ФОКУСИРОВКИ И АНОМАЛИИ В ЛУЧЕВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ</b>                                       | <b>438</b> |
| 3.5.1      | Уравнения эйконала и переноса  | 438        |
| 3.5.2      | Рефракция акустических лучей   | 442        |
| 3.5.3      | Фактор фокусировки акустических лучей  | 450        |
| 3.5.4      | Фактор фокусировки при постоянном градиенте скорости звука   | 457        |
| 3.5.5      | Фактор аномалии при кусочно-линейной аппроксимации ВРСЗ  | 459        |
| 3.5.6      | Оценка акустического поля в океане   | 461        |
| <b>3.6</b> | <b>РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ</b>   | <b>465</b> |
| 3.6.1      | Понятие мелкого моря   | 465        |
| 3.6.2      | Теория нормальных волн применительно к мелкому морю  | 467        |
| 3.6.3      | Механизм формирования поля в мелком море   | 480        |
| 3.6.4      | Метод мнимых источников  | 491        |
|            | Контрольные вопросы  | 497        |
| <b>4</b>   | <b>ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН</b>   | <b>498</b> |
| <b>4.1</b> | <b>ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ИЗЛУЧЕНИЯ</b>  | <b>498</b> |
| 4.1.1      | Сопротивление излучения и акустическая мощность излучателя   | 500        |
| 4.1.2      | Дальняя и ближняя зоны гидроакустического поля при излучении   | 507        |
| 4.1.3      | Понятие о направленном действии излучателей  | 513        |
| <b>4.2</b> | <b>ПРИЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН</b>  | <b>522</b> |
| 4.2.1      | Физическая сущность процесса приема звука  | 522        |
| 4.2.2      | Дифракционный интеграл Кирхгофа-Гельмгольца и поле рассеянной волны  | 523        |
| 4.2.3      | Применение формулы Кирхгофа-Гельмгольца для решения задач о рассеянии волн телами  | 537        |
| <b>4.3</b> | <b>АКУСТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИЕМНИКА</b>  | <b>543</b> |
| 4.3.1      | Акустическое давление на жестком препятствии   | 543        |
| 4.3.2      | Акустическое давление на жестком не заторможенном препятствии  | 545        |
| 4.3.3      | Прием звука в полосе частот  | 549        |
|            | Контрольные вопросы  | 552        |
| <b>5</b>   | <b>ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КОРАБЛЯ. ПОМЕХИ РАБОТЕ ГАС. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В СТАТИСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ</b> | <b>553</b> |
| <b>5.1</b> | <b>ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ. ПЕРВИЧНОЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КОРАБЛЯ</b>   | <b>553</b> |
| 5.1.1      | Первичное гидроакустическое поля корабля. Характер и механизмы формирования  | 555        |
| 5.1.2      | Спектральные составляющие первичного поля корабля  | 560        |
| 5.1.3      | Количественные характеристики подводных шумов кораблей   | 562        |
| <b>5.2</b> | <b>ВТОРИЧНОЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КОРАБЛЯ. ХАРАКТЕР И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ</b>  | <b>568</b> |
| 5.2.1      | Зеркальная и диффузионная составляющая вторичного ГАПК   | 525        |
| 5.2.2      | Гидроакустические характеристики объектов по вторичному полю   | 569        |
| 5.2.3      | Методы снижения вторичного гидроакустического поля   | 575        |
|            | Контрольные вопросы  | 578        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>5.3</b> | <b>ПОМЕХИ РАБОТЕ ГАС. ХАРАКТЕР И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ</b>                   | <b>579</b> |
| 5.3.1      | Общие сведения о поле помех работе ГАС. Виды помех                            | 579        |
| 5.3.2      | Электрические помехи  | 582        |
| 5.3.3      | Акустические помехи   | 583        |
| 5.3.4      | Явление реверберации и реверберационная помеха                                | 597        |
|            | Контрольные вопросы   | 610        |
| <b>5.4</b> | <b>МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОМ ОКЕАНЕ</b>            | <b>611</b> |
| 5.4.1      | Распространение звука в статистически однородной изотропной среде             | 613        |
| 5.4.2      | Параметры и режимы флуктуаций в плоскости $\Lambda - \Phi$                    | 617        |
| 5.4.3      | Метод геометрической оптики при наличии флуктуаций                            | 620        |
| 5.4.4      | Статистика акустических сигналов  | 625        |
| 5.4.5      | Различные области плоскости $\Lambda - \Phi$ в неоднородном океане            | 628        |
| 5.4.6      | Распространение импульсов в неоднородном океане                               | 634        |
| 5.4.7      | Статистика фазы и интенсивности   | 638        |
| 5.4.8      | Океаническая среда как канал передачи информации                              | 640        |
|            | Контрольные вопросы   | 650        |
| <b>6</b>   | <b>ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.</b>                          | <b>651</b> |
| <b>6.1</b> | <b>ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ</b>   | <b>652</b> |
| 6.1.1      | Понятие дальности действия ГАС  | 652        |
| 6.1.2      | Эффект Доплера и его влияние на полосу частот приемного тракта                | 657        |
| 6.1.3      | Виды дальности действия ГАС   | 665        |
| 6.1.4      | Факторы, влияющие на дальность действия ГАС                                   | 671        |
| <b>6.2</b> | <b>УРАВНЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГАС В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ</b>                   | <b>673</b> |
| 6.2.1      | Уравнение дальности в режиме шумопеленгования                                 | 674        |
| 6.2.2      | Уравнения дальности в режиме связи и ОГС                                      | 681        |
| 6.2.3      | Уравнение дальности в режиме эхопеленгования                                  | 683        |
| 6.2.4      | Влияние реверберации на дальность действия ГАС                                | 690        |
| 6.2.5      | Уравнения дальности с учетом реверберации                                     | 695        |
| <b>6.3</b> | <b>ОПТИМАЛЬНЫЕ РАБОЧИЕ ЧАСТОТЫ ГАС</b>  | <b>699</b> |
| 6.3.1      | Оптимальные рабочие частоты ГАС в различных режимах                           | 699        |
| 6.3.2      | Энергетическая дальность действия гидролокатора в условиях шумовой помехи     | 706        |
| 6.3.3      | Оценка точности гидроакустического пеленгования                               | 708        |
| 6.3.4      | Оценка энергетической дальности действия графическим методом                  | 711        |
| <b>6.4</b> | <b>РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЦЕЛИ</b>                               | <b>715</b> |
|            | Контрольные вопросы   | 723        |
|            | <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>   | <b>724</b> |
| <b>3.1</b> | <b>КРАТКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПРОЙДЕННОГО МАТЕРИАЛА</b>                                | <b>724</b> |
| <b>3.2</b> | <b>ПЕРСПЕКТИВЫ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА</b> | <b>728</b> |
|            | <b>ЛИТЕРАТУРА</b>   | <b>736</b> |

---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

Изучение Мирового океана с каждым годом становится все более актуальной задачей как в научном, так и в техническом отношении. Каждый год возникают все новые проблемы и становится ясным, что многие, казалось бы, давно изученные вопросы, оказываются значительно более сложными, чем это предполагалось, и все еще далеки от своего решения. В современных исследованиях Мирового океана одинаково важна роль как теоретических работ, так и экспериментальных исследований, приводящихся в натуральных условиях. Многие старые традиционные методы экспериментального исследования океана, появившиеся 50÷100 лет тому назад, в основном являются «контактными» методами. Они основаны на измерении тех или иных характеристик океанической среды с помощью прибора, опускаемого на выбранную глубину и вступающего в непосредственный контакт с тем элементом среды, характеристики которого он измеряет. К таким приборам относятся многочисленные регистраторы температуры, солености, скорости и направления течений и пр. Техника таких измерений совершенствуется, но принцип — необходимость прямого контакта прибора и элемента среды — сохраняется неизменным. Легко представить себе, какой колоссальный труд был затрачен, прежде чем человечество накопило сведения, позволившие нарисовать общую картину хотя бы основных закономерностей, присущих Мировому океану.

Значительно менее трудоемкими оказываются бесконтактные, дистанционные методы экспериментального исследования. Они основаны на том, что любой сигнал, любое излучение, прошедшее тот или иной путь в океанической среде, изменяются под воздействием среды. Изучая эти изменения, можно получить информацию о свойствах среды. Простейшим и наиболее распространенным примером дистанционных приборов являются эхолоты промера глубин дна. Не нужно объяснять, сколь далеко идущие последствия имел переход к эхолотам от проволочных лотов первой четверти этого века. Широкое распространение акустических эхолотов позволило в относительно короткий срок составить батиметрические карты Мирового океана, открыть систему срединно-океанических хребтов и глубоководных впадин. Другие акустические (также дистанционные) методы позволили получить картину геологического строения дна под океаном задолго до начала работ по глубинному бурению в открытом океане.

Использование в дистанционных методах акустических волн не является случайным. Толща вод океана, не говоря уже о породах дна, почти непрозрачна для всех видов электромагнитных волн, обеспечивающих основные коммуникации в атмосфере Земли и за ее пределами. Радиоволны практиче-

ски совсем не проникают в морскую воду вследствие ее электропроводности и затухают на расстоянии много меньше длины волны; освещенность в видимой части светового спектра падает в морской воде в тысячи раз на протяжении десятков, в лучшем случае, одной-двух сотен метров. И лишь звуковые волны могут распространяться в водной среде на сотни километров.

Это несомненное преимущество акустических волн над другими видами излучения определило их широкое использование в приборах, предназначенных для работы в водах морей и океанов. Задачи таких приборов не ограничены целями исследования океана. Подводные акустические приборы или как их часто называют, гидроакустические средства, широко используются и для решения многих прикладных задач.

Гидроакустические приборы и средства решают следующие задачи:

- *поиск рыбных скоплений и некоторые приемы рыболовства;*
- *поиск полезных ископаемых на поверхности и в глубинах дна морей и океанов;*
- *обнаружение и распознавание морских военных средств противника (кораблей, подводных лодок, мин и пр.);*
- *осуществление связи с погруженными подводными лодками;*
- *дистанционное управление различными подводными аппаратами;*
- *мониторинг водной среды и многие другие задачи.*

Как было уже сказано океаническая среда по своим свойствам неоднородна в пространственно-временных координатах и поэтому прогнозирование процессов распространения гидроакустических сигналов, определение дальности действия ГАС является сложной как в теоретическом плане, так и в практической реализации. Но знание основных принципов лежащих в основе физических процессов, происходящих в океане имеют огромное прикладное значение. Без учета влияния океанической среды на распространение звука невозможно эффективное применение ГАСр различного назначения.

Во многих случаях и необходимость использования подводных акустических приборов, исследователи и инженеры-разработчики аппаратуры наталкиваются на значительные трудности, связанные с особенностями распространения звуковых волн в воде. Океаническая среда значительно сильнее влияет на распространение звука, чем, скажем, атмосфера и, тем более, межзвездное пространство влияют на распространение света и электромагнитных колебаний.

К особенностям распространения звука в океанической среде относятся:

- *пространственно-временная неоднородность океана по различным параметрам приводит к тому, что направления распространения акустических волн в водах океана подвержены сильным рефракционным искажениям;*

- *акустические сигналы отражаются от дна и поверхности океана, часть, причем иногда значительная, энергии акустической волны рассеивается на неоднородностях среды, а также на неровностях поверхности и дна океана;*
- *относительно низкая скорость звука в воде, поэтому эффект Доплера проявляется более сложно чем скажем в радиолокации;*
- *флуктуационные процессы в океанической среде носят сложный и многообразный характер, а в силу малой скорости звука, на больших дистанциях акустический канал нельзя считать «замороженным», т.е. за время прохождения акустического сигнала свойства среды могут меняться;*
- *сильное влияние специфической гидроакустической помехи как реверберация, которая проявляется не только как отражение от границы, но и от объема воды, в силу наличия многообразных неоднородностей в среде;*
- *сложная помеховая и шумовая обстановка, которая сильно зависит от пространственно-временных координат и т.д.*

Это породило взаимные связи, а в ряде случаев и взаимопроникновение двух разных отраслей науки — океанологии и акустики. Родилось новое научное направление — акустика океана.

Акустика океана изучает две группы вопросов:

*во-первых*, влияние океанической среды на законы распространения в ней акустических полей, так называемые прямые задачи;

*во-вторых*, методы извлечения информации о среде по искажениям прошедших через нее акустических волн, так называемые обратные задачи, лежащие в основе всех дистанционных акустических методов исследования океана.

Естественно, что решение обратных задач всегда базируется на предварительном изучении определенного круга прямых задач — изучении особенностей влияния среды на распространение в ней звуковых волн. В предлагаемой книге рассматриваются задачи лишь первого типа, названные здесь прямыми за дачами. Временные и географические вариации свойств океанической среды влекут за собой и соответствующие вариации законов распространения акустических волн; таким образом, акустика океана имеет, в известной мере, и географический аспект. Мы практически не будем касаться этого аспекта и сосредоточим свое внимание на физических механизмах тех или иных явлений.

Эти эффекты существенно искажают распространяющиеся акустические сигналы и могут привести к значительной потере, содержащейся в них информации. Однако сильное влияние океанической среды на распространяющиеся в ней акустические поля, имеет, как мы говорили, и другую сторону. Искажения акустического сигнала, т. е. изменения его под влиянием среды,

неизбежно несут в себе информацию об этой среде. Если эту информацию удастся расшифровать и найти, однозначную связь между изменениями сигнала и свойствами среды, то это открывает возможности изучения самой океанической среды с помощью акустических методов.

Физические процессы воздействия океанической среды на распространение в ней акустических волн весьма сложны и не до конца изучены. Они рассматриваются в различных монографиях, учебниках, учебных пособиях, научных статьях и рассчитаны на широкий круг читателей от курсантов гидроакустических факультетов до специалистов и научных работников, специализирующихся в области океана. Для изучения и понимания этих работ необходимо владеть методами математической физики, в частности, волновой акустики и теории дифракции. Законы распространения акустических волн в океане имеют большое практическое значение для исследований самого океана и для решения прикладных задач. Знание этих законов необходимо как специалистам, работающим в области океанологии, акустики океана и гидроакустики, так и инженерам, разрабатывающим и эксплуатирующим различную гидроакустическую аппаратуру. Использование ими существующей научной литературы по акустике океана затруднено высокой степенью ее специализированности, узкой профессионализацией и, во многих случаях, математическими трудностями.

В предлагаемом учебном пособии материал изложен в максимально доступной форме основные сведения о распространении звука в океане, полезные, с нашей точки зрения, курсантам и специалистам и которые, могут быть полезными как в исследовательской, так и практической деятельности.

Учебное пособие содержит два раздела «Теоретические основы гидроакустики» и «Акустика океана». В определенной степени такое деление условно и направлено в основном на методические аспекты представления материала, которые можно кратко описать как движение «от общего к частному».

В целом учебное пособие написано с требованиями программы по дисциплине «Теоретические основы гидроакустики и акустики океана», состоит из предисловия, введения, 2-х разделов и 6 глав с пунктами и подпунктами и включает в себя 738 страниц текста и большое количество иллюстраций и примеров.

**Раздел I «Теоретические основы гидроакустики»** данного учебного пособия посвящен рассмотрению вопросов, посвященных математическому описанию процессов распространения звука в идеальной однородной среде, а также рассмотрено влияние неоднородностей и границ на поглощение и рассеяние акустической энергии. Раздел состоит из 5 глав.

*В первой главе «Основные понятия гидроакустики. Характеристики моря как неоднородной звукопроводящей среды»* рассмотрены основные определения и понятия в гидроакустике их взаимосвязь с физическими характери-

стиками водной среды. Введены понятия акустической волны, давления, колебательной скорости, интенсивности, фронта и т.д. В этой же главе введено понятие относительных единиц измерения акустических параметров, рассмотрены факторы, влияющие на распространение звука в океанической среде. В главе довольно подробно представлены результаты многолетних исследований по затуханию звука, рассмотрены механизмы возникновения затухания звука в морской среде, зависимость скорости звука от гидрофизических параметров океана, понятие распределения скорости звука по пространственным координатам и времени, дисперсии скорости звука и методы определения скорости звука.

*В второй главе «Волновой подход к описанию акустического поля. Методы оценки, анализа и решения задач гидроакустики» на основе уравнений гидродинамики получены волновые уравнения распространения звука в идеальной жидкости. В главе также рассмотрены точные и приближенные методы решения волновых уравнений, взаимосвязь между этими решениями. Особое внимание уделено методу лучевой акустики. Приведено сравнение методов лучевой и волновой акустики, их достоинства и недостатки, рассмотрены поля плоской, сферической и цилиндрической волн. Для плоских волн результате решения волнового уравнения для случая идеальной среды получено отношение, которое носит название основным законом акустики или законом Ома в акустике. Показано, что волновое сопротивление для плоской волны носит чисто вещественный характер, а для сферических и цилиндрических волн комплексный, приведены основные соотношения, описывающие поведение акустической волны в частично или полностью ограниченных средах, рассмотрено нормальное и наклонное падение плоской волны на границу двух сред. Показано, что в основе распространения акустических волн лежит закон Снеллиуса, который является основой построения траекторий акустических лучей и оценки акустического поля в различных гидрофизических условиях. Получены основные выражения описывающие характеристики акустической волны при прохождении слоя воды. В этой же главе подробно изучены вопросы переизлучения звука неровными границами, введено понятие силы рассеивания. Показано, что неровная поверхность приводит к появлению детерминированной и случайной компонент, приводящих к формированию рассеянного акустического поля. Применительно к океанической среде представлены результаты отражения звука от границы воздух-вода и вода-дно.*

**Раздел II «Акустика океана»** данного учебного пособия посвящен рассмотрению вопросов, связанных с акустикой океана и с особенностями распространения звука в океанической среде. Как было уже сказано океаническая среда по своим свойствам неоднородна в пространственно-временных координатах и поэтому прогнозирование процессов распространения гидроакустических сигналов, определение дальности действия ГАС является слож-

ной как в теоретическом плане, так и в практической реализации. Но знание основных принципов лежащих в основе физических процессов, происходящих в океане имеют огромное прикладное значение. Без учета влияния океанической среды на распространение звука невозможно эффективное применение ГАСр различного назначения.

*В третьей главе «Распространение звука в слоисто-неоднородном океане. Основные гидроакустические явления в океане»* рассмотрены гидроакустические явления в океане, а именно: типовые распределения скорости звука, положительная и отрицательная рефракция, слой скачка, приповерхностный и подводный звуковые каналы. Описаны физические факторы, приводящие к их возникновению. В условиях применимости лучевой акустики приведена методика построения траекторий акустических лучей для случая неоднородности океана по глубине. На основе лучевой теории рассмотрены такие понятия как фактор фокусировки и фактор аномалии и показано, что при распространении акустических волн в неоднородном океане возникает зональная структура акустического поля. При аккумуляции акустической энергии в приповерхностном и подводном звуковом канале появляются дальние зоны акустической освещенности, которые особенно сильно выражены, когда источник находится не на оси ПЗК. В главе также рассмотрены особенности распространения звука в мелком море.

*В четвертой главе «Излучение и прием гидроакустических волн»* рассмотрена сущность процесса излучения и приема гидроакустических волн и показано, что для определения эффективности взаимодействия при излучении необходимо вычислить работу, совершаемую источником акустических волн по преодолению сил реакции внешней упругой среды. Фундаментальный принцип, который лежит в основе теории излучения и приема является принцип взаимности, который позволяет по известному поведению в режиме излучения установить поведение в режиме приема. При получении основных математических зависимостей широко используется дифракционный интеграл Кирхгофа-Гельмгольца. В главе рассмотрен также вопрос приема акустических волн в полосе частот, который имеет большое практическое значение.

*В пятой главе «Гидроакустическое поле корабля. Помехи работе ГАС. Особенности распространения звука в статистически неоднородной среде»* показано, что формируемые кораблем и подводными объектами физические поля очень многообразны, но наиболее важным из них является гидроакустическое поле, которое разделяют на первичное и вторичное поле корабля. Источниками первичного акустического поля корабля являются работающие механизмы, гребные винты, гидродинамические процессы и т.д. Спектр первичного акустического поля является суммой дискретных и непрерывных компонент. Вторичное гидроакустическое поле является полем отраженных сигналов. Его формирование во многом зависит от радиуса эквивалентной

сферы, которая обладает такой же отражающей способностью, как и реальный объект. Радиус эквивалентной сферы или ее относительный эквивалент сила цели входит в уравнение дальности для режима гидролокации. В целом акустическое поле является не только демаскирующим фактором, по которому можно обнаружить источник этого поля (надводный корабль, подводная лодка, торпеда и т.д.), но также является источником помех для собственных ГАС. Поэтому в главе 5 рассматриваются также механизмы формирования помех работе ГАС, виды помех и методы расчета (анализа) параметров электрических, акустических и реверберационных помех. Показано, что реальный океан нельзя рассматривать как детерминированный канал распространения акустических колебаний. В силу целого ряда причин его параметры акустического поля флуктуируют во времени, что является следствием временных флуктуаций скорости звука в океане, скорости течения воды, волнения ее поверхности. В этом случае акустическое давление будет решением стохастического волнового уравнения, в котором некоторые коэффициенты являются случайными функциями, а верхняя граница – случайной поверхностью. В главе рассмотрены различные подходы решения стохастических волновых уравнений: борновское приближение, метод Рытова, модифицированный метод борновского приближения, также статистические характеристики флуктуаций скорости звука, корреляционные функции и интервалы корреляции по координатам и т.д. Для описания неоднородностей и флуктуаций акустических сигналов вводится плоскость  $\Lambda - \Phi$ , где  $\Lambda$  – дифракционный параметр, а  $\Phi$  – параметр, характеризующий степень неоднородности среды. На плоскости  $\Lambda - \Phi$  выделяют области частично насыщенных флуктуаций, полностью насыщенных и ненасыщенных флуктуаций. В океане наблюдаются блуждания и размытия импульса, которые приводят к удлинению импульса. Девятая глава посвящена также рассмотрению океана как пространственно-временного фильтра.

*В шестой главе «Дальность действия гидроакустических средств»* дается представление о дальности действия ГАС, ее видах, факторах, влияющих на дальность, а также исследуются уравнения дальности в различных режимах работы ГАС. В главе также рассматриваются вопросы определения выбора оптимальных частот в различных режимах работы гидроакустических средств в условиях шумовой и реверберационной помехи, вопросы использования ЭВМ и прикладного программного обеспечения в интересах решения задач анализа гидрофизических условий и оценки дальности действия ГАС, оценка точности гидроакустического пеленгования и расчет точности определения глубины цели.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

|      |   |
|------|---|
| АА   | акустическая антенна                          |
| АПК  | акустические поля корабля                     |
| АРУ  | автоматическая регулировка усиления           |
| БЗАО | ближняя зона акустической освещенности        |
| ВРСЗ | вертикальное распределение скорости звука     |
| ГАК  | гидроакустический комплекс                    |
| ГАПК | гидроакустическое поля корабля                |
| ГАС  | гидроакустическая станция                     |
| ГАСр | гидроакустические средства                    |
| ГАУ  | гидроакустические условия                     |
| ГЛС  | гидролокационные станции                      |
| ГСС  | горизонт слоя скачка                          |
| ГССЗ | горизонт скачка скорости звука                |
| ДЗАО | дальняя зона акустической освещенности        |
| ДН   | диаграмма направленности                      |
| ВАРУ | временная автоматическая регулировка усиления |
| ВХО  | временные характеристики обнаружения          |
| ЗО   | зона освещения                                |
| ЗРС  | звукорассеивающий слой                        |
| ДС   | динамическая система                          |
| ДН   | диаграмма направленности                      |
| ЗПС  | звукоподводная связь                          |
| ИОП  | индикатор отклонения пеленга                  |
| ИСЗ  | измеритель скорости звука                     |
| КК   | коэффициент концентрации                      |
| КНД  | коэффициент направленного действия            |
| КУ   | курсовой угол                                 |
| КФ   | корреляционная функция                        |
| НК   | надводный корабль                             |
| ОГС  | обнаружения гидроакустических сигналов        |
| ОКР  | Опытно-конструкторские работы                 |
| ОМ   | острота максимума                             |
| ОР   | отрицательная рефракция                       |
| ОСП  | отношение сигнал/помеха                       |
| ОНД  | острота направленного действия                |
| ОРПС | отрицательная рефракция в поверхностном слое  |
| ПВО  | полное внутреннее отражение                   |

|         |                                      |
|---------|--------------------------------------|
| ПГЛП    | противогидролокационное покрытие     |
| ПЗК     | подводный звуковой канал             |
| ПК      | показатель качества                  |
| ПЛ      | подводная лодка                      |
| ПО      | порог обнаружения                    |
| ПН      | показатель направленности            |
| ППЗК    | приповерхностный звуковой канал      |
| ПР      | положительная рефракция              |
| СВ и ОП | связи и опознавания                  |
| СКО     | среднеквадратическое отклонение      |
| СИ      | средства измерения                   |
| СП      | спектральная плотность               |
| СС      | слой скачка                          |
| СЦ      | силы цели                            |
| РП      | реверберационная помеха              |
| ТРСЗ    | типовое распределение скорости звука |
| УГ      | устройство генерирования             |
| УИ      | уровень излучения                    |
| УП      | уровень помех                        |
| ФПК     | физическое поле корабля              |
| ХН      | характеристики направленности        |
| ШП      | шумопеленгование                     |
| ЭП      | эхопеленгование                      |
| ЭРЦ     | эквивалентный радиус цели            |

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

|                |  |
|----------------|--|
| $\xi$          | смещение   |
| $\xi'$         | колебательная скорость                                 |
| $\xi''$        | колебательное ускорение                                |
| $N_I$          | уровень интенсивности звука                            |
| $N_p$          | уровнем звукового давления                             |
| $C$            | распределение скорости скорость звука в среде          |
| $\Delta C_i$   | интервал скорости звука на границах слоя               |
| $G$            | градиент скорости звука                                |
| $a$            | относительный градиент скорости звука                  |
| $\rho$         | плотность среды  |
| $\chi$         | модуль объемной упругости                              |
| $\beta$        | коэффициент пространственного затухания                |
| $J$            | интенсивность звука                                    |
| $k$            | волновое число   |
| $W_a$          | акустическая мощность                                  |
| $\Delta$       | оператор Лапласа                                       |
| $\nabla$       | оператор Гамильтона                                    |
| $V_J (V_P)$    | коэффициенты отражения по интенсивности (давлению)     |
| $\lambda$      | длина волны  |
| $f$            | частота  |
| $\omega$       | круговая (циклическая) частота                         |
| $\Delta f$     | полоса пропускания приемного тракта                    |
| $\tau$         | длительность сигнала                                   |
| $T$            | сила цели  |
| $R_s$          | эквивалентный радиус цели                              |
| $Rel$          | параметр Рэлея   |
| $\Phi$         | звуковой потенциал                                     |
| $z_s$          | сопротивление излучения                                |
| $k_u (k_{np})$ | коэффициент концентрации излучающей (приемной) антенны |
| $\delta$       | коэффициент распознавания                              |
| $F$            | фактор фокусировки                                     |
| $A_f$          | фактор аномалии  |
| $G(f)$         | спектральная плотность                                 |
| $R(\tau)$      | корреляционная функция                                 |
| $\delta(t)$    | дельта-функция   |
| $\alpha$       | мультипликативный коэффициент                          |
| $q$            | курсовой угол  |

---

---

# ВВЕДЕНИЕ

---

---

## В.1. Общая характеристика учебной дисциплины, и задачи обучения

Курс «Основы гидроакустики и акустика океана» является фундаментальным, так как в нем излагаются научные понятия и методы, на основе которых постоянно развивается и совершенствуется гидроакустическая техника. Одной из основных задач, стоящих перед современной прикладной гидроакустикой, в настоящее время являются – проблема изучения характеристик морской среды и проблема описания преобразований сигналов при распространении в океане.

Решение этих задач позволит создавать практически значимые модели гидроакустических каналов распространения, а также модели гидроакустических сигналов и помех, что в конечном счете приведет к разработке и внедрению в гидроакустическую технику эффективных методов обработки сигналов в различных режимах работы гидроакустических средств. Большое значение имеют вопросы теоретической и прикладной гидроакустики также при разработке наиболее эффективных способов боевого применения гидроакустических средств.

Преобразование сигналов, вследствие влияния реального гидроакустического канала требуют широкого применения математической статистики, теории случайных процессов, линейной и нелинейной алгебры, функционального анализа, теории математической физики, теории функции комплексной переменной, теории групп и обобщенных функций.

Многообразие имеющихся преобразований, стохастический характер получаемых данных от морских объектов приводит к синтезу все более сложных и изощренных алгоритмов обработки, которые бы учитывали все явления, существенно влияющие на сигнал. При этом, классические подходы, основанные на блочных алгоритмах во многих случаях, становятся неэффективными, в частности, при обработке нестационарных процессов, негауссовских распределениях и т.д. Все это требует построения новых математических моделей, основанных на применении динамического представления помехо-сигнальной обстановки и канала распространения гидроакустических сигналов, что требует знания теории стохастических уравнений и методов оптимальной и субоптимальной оценки случайных процессов. Таким образом, знание основ гидроакустики требуется при изучении комплекса специальных дисциплин, которые необходимы как специалисту среднего звена, так и офи-

церам гидроакустикам.

Следует отметить, что стиль и последовательность изложения, принятые в данном учебном пособии, продиктованы во многом соображениями педагогического характера, а также традициями, сложившимися в гидроакустике. Учебное пособие не ставит целью дать исчерпывающее изложение всех вопросов теоретической гидроакустики и акустики океана, хотя и включает наиболее важные из них. Задача учебного пособия дать знания о наиболее важных понятиях в гидроакустике, их взаимосвязи и аналитические зависимости между ними.

Специалист – гидроакустик, внимательно проработав учебное пособие, сможет самостоятельно продолжить работу в интересующем его направлении на основе литературных источников.

Звуковые волны – единственные из волн известной физической природы способны распространяться под водой на расстояние многих сотен километров. Эта уникальная способность акустических волн и обуславливает тот практический интерес, который проявляют к особенностям распространения звука в океане ученые и инженеры самых разных ориентаций: геофизики, специалисты в области подводной локации и связи, экологи и океанологи.

Распространение звуковых волн под водой – крайне сложный процесс, трудность описания которого обусловлена большим многообразием явлений и свойств, присущих различным районам Мирового океана. В первую очередь это относится к шельфовым зонам океана, где особенности распространения звуковых волн связаны с их взаимодействием с морским дном, а также со специфическим характером гидродинамических возмущений. Вместе с тем океанский шельф наиболее важен для жизнедеятельности человека и, следовательно, больше всего интересен для исследований. Возможность же практической работы по акустике океанского шельфа обусловлена появлением в последние десятилетия соответствующих технических средств – излучателей и приемников акустических волн, средств обработки, соответствующей ВТ.

*Акустика океана* – молодая наука. Она быстро развивается, что, прежде всего, стимулируется требованиями практики, а также новыми открытиями в динамике океана.

*Предметом акустики океана* является теория распространения акустических волн в океане и развитые ею приложения, базирующиеся на экспериментальных данных.

*Научной основой акустики океана* являются: дифференциальное и интегральное исчисление, математическая физика, теория вероятности и математическая статистика, гидрофизика, гидродинамика и океанология.

До настоящего времени акустические волны остаются единственным видом излучения, которое может распространяться в морской среде на большие

расстояния. Для дистанционного зондирования с помощью любых других средств основная толща океана остается недоступной.

В современной акустике океана особый интерес проявляется к низким частотам, что связано с возможностью реализации больших дальностей обнаружения на этих частотах подводных объектов. Переход к низким частотам также необходим для акустического просвечивания все больших толщ океанского дна. Весьма важным также является исследование модового состава звукового поля, включая его тонкую структуру, на фиксированных, иногда достаточно больших трассах. Самые разные динамические явления в океане – вихри, волны Россби, внутренние и поверхностные волны нарушают эту стабильность.

Исследование подводных шумов океана становится все более актуальным, прежде всего, в связи с разворачиванием систем освещения подводной обстановки, для которых основным фактором, ограничивающим их эффективность, является собственный шум океана.

Проблемными являются вопросы, касающиеся расширения диапазона использования частот выше 60 кГц и ниже 20 Гц, совершенствования методов прогнозирования условий распространения гидроакустических сигналов в мелком море, особенно на низких частотах и больших дальностях в пассивном режиме работы гидроакустических средств. Многие достижения в области акустики океана обязаны трудам выдающихся российских и советских ученых.

Основными целями освоения дисциплины являются закрепление и углубление теоретической подготовки обучающегося и приобретение им практических навыков и компетенций в сфере профессиональной деятельности, подготовка выпускника в объеме квалификационных требований, способного эффективно исполнять должностные обязанности по предназначению.

## **В.2. Историческая справка**

История развития гидроакустики неразрывно связана с историей развития гидроакустических средств на различных этапах развития гидроакустики.

Начало развитию гидроакустических средств было положено на рубеже 19-го – 20-го веков.

В России в 1891 г. адмирал С. О. Макаров предложил гидроакустическую телеметрическую систему для океанографических исследований.

С 1905 года в Санкт-Петербурге заведующий морской испытательной станцией беспроводного телеграфирования при Дерябинских казармах Роберт Ниренберг начал исследования по звукоподводной телеграфии. В ноябре 1906

года на Неве в процессе испытаний подводного телеграфа системы Ниренберга сигналы передавались через воду при помощи:

- 1) гидравлической сирены;
- 2) пневматического молотка, ударявшего по мембране, зажатой между фланцами в стенках деревянного ящика, находящегося в воде.

В 1907 году был получен патент «Передающая станция для беспроводного (гидрофонического) телеграфирования через воду».

В период, предшествующий началу I Мировой войне проводились исследования по установке систем подводной сигнализации (телеграфирования) как на надводных кораблях, так и на первых проектах подводных лодок. Аналогичные исследования и разработки велись и на Западе (США, Франция и др.).

Опыт успешного применения в вооруженной борьбе на море в период I Мировой войне подводных лодок дал колоссальный толчок развитию активных гидроакустических средств.

Настоящим прорывом в области гидроакустической техники несомненно нужно считать работы, начатые русским ученым К. В. Шиловским в лаборатории французского физика П. Ланжевена. В мае 1916 года ими была подана заявка на патент «Способ и устройства для генерирования направленных подводных сигналов для дистанционного обнаружения подводных препятствий». В этом же году во время экспериментов в Тулоне получен четкий отраженный сигнал от мины диаметром 90 см на расстоянии 100 м.

К концу I Мировой войны многочисленные эксперименты показали, что погруженная подводная лодка может быть обнаружена с применением метода активной локации на дистанциях до 2 км, а дальность подводной сигнализации (связи) при этом составляет до 9 км.

В послевоенный период УГ и ФС активных ГАС в основном развивались по пути совершенствования ламповых генераторных устройств с учетом возможностей излучателей новых конструкций, в том числе и разработанных магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей. Огромный вклад в развитие активных ГАС в этот период в СССР внесли С.Я. Соколов (заведующий кафедрой электроакустики при ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) и начальник акустического отдела ЦЛРЗ (Центральная радиолaborатория – завод)), академик А.И. Берг, В.Н. Тюлин, Н.Н. Андреев, Л.Я. Гутин, В.С. Григорьев и др. Активно изучался опыт создания активных ГАС за рубежом (прежде всего в Германии).

В течение 1938 года на вооружение кораблей ВМФ СССР были приняты станции звукоподводной связи «Арктур», «Сириус», «Персей». В марте 1941 года принята на вооружение ВМФ СССР серийная ультразвуковая ГАС подводного наблюдения «Тамир-1».

В начальный период ВОВ началось производство ультразвуковых ГАС подводного наблюдения «Тамир-2» (для вооружения кораблей типа СКР, тральщиков) и «Тамир-3» (для вспомогательных кораблей). Начиная с конца 1942 и в послевоенные годы начинаются разработка, модернизация и производство ультразвуковых ГАС подводного наблюдения «Тамир-5», «Тамир-7» – «Тамир-15». С начала 1946 года началась разработка гидролокатора кругового обзора «Геркулес» на основе американских и немецких аналогов.

В соответствии с Постановлением СМ СССР от 10 августа 1948 года в части касающейся активных ГАС были поставлены задачи:

Выполнить в течение 1950-52 гг. следующие работы, с целью достижения максимально возможных дальностей и точностей обнаружения погруженных подводных лодок:

1) Разработку корабельной гидролокационной станции для обнаружения и определения местоположения погруженных подводных лодок (ПЛ).

2) Разработку береговых гидролокационных станций для обнаружения и определения местоположения погруженных подводных лодок.

В 1950-1952 гг. были определены следующие главные задания по научно-исследовательским и ОКР в области гидролокации:

1. Считать важнейшими работами в области гидроакустики и гидролокации:

- *вооружение всех классов надводных и подводных кораблей Военно-морских сил гидролокационными станциями, обеспечивающими наблюдение за целями на больших скоростях, аппаратурой связи;*
- *разработку методов подводного ультразвукового видения;*

2. Считать специализацией завода и Особого конструкторского отдела при заводе (ОКБ-206) разработку и изготовление гидролокационных станций, приборов подводной связи.

3. Возложить на завод проведение научно-исследовательских работ, обеспечивающих дальнейшее улучшение ТТД гидролокационных станций и гидроакустических приборов.

Приоритетным обозначена разработка следующих активных ГАС:

«Тамир-11» – корабельная ГЛС автоматического шагового поиска, УЗД для обнаружения пл в подводном положении, минных полей и отдельных мин с охотников за пл (главный конструктор (ГК) – Б. Н. Вовнобой).

«Пегас» — корабельной гидролокационной станции автоматического шагового поиска ультразвукового диапазона для обнаружения подводных лодок в подводном положении, минных полей и отдельных мин с кораблей среднего и большого водоизмещения (главный конструктор – Н.Д. Куприянов);

«Геркулес-2» — корабельная гидролокационная станция кругового и шагового поиска ультразвукового диапазона для обнаружения подводных лодок в подводном положении, минных полей и отдельных мин с кораблей большого водоизмещения (главный конструктор – З.Н. Умиков).

«Плутоний» — корабельная гидролокационная станция для обнаружения кораблей, минных полей и отдельных мин с подводных лодок среднего и большого водоизмещения (главный конструктор – А.С. Василевский).

В том или ином виде вышеуказанные активные ГАС начали поступать на вооружение ВМФ СССР в начале 50-х годов.

Важнейшим звеном в развитии отечественной гидроакустической техника стало создание в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР от 18. 05. 49 № 2033-770 на базе ОКБ завода № 206 (ОКБ-206) Минсудпрома СССР первого в стране научно-исследовательского института гидролокации и гидроакустики – НИИ-3 Минсудпрома. (в последствии ЦНИИ «Морфизприбор», в настоящее время – концерн «Океанприбор»).

С 1958 года гидроакустическим станциям, принятым на вооружение, начали присваивать шифр МГ (морская гидроакустическая).

Начиная с 1961 года на вооружение кораблей ВМФ СССР начали поступать ГАС МГ-312, МГ-322, МГ-332 и ГАС миноискания МГ-69, МГ-79, МГ-89. Основными направлениями развития ГАС являлись совершенствование ламповых генераторных устройств (ГАС МГ-312, МГ-322, МГ-332), широкое внедрение транзисторных генераторов (ГАС миноискания).

В 1966 году принят на вооружение первый отечественный ГАК для вооружения ПЛ МГК-100 (морской гидроакустический -100), а в 1968 году освоен в серийном производстве ГАК для вооружения ПЛ МГК-300.

В 1971 году проведена модернизация ГАС МГ-322, МГ-332 введением в состав УГ и ФС данных станций тиристорных генераторов (ГАС МГ-322Т, МГ-332Т). В начале и середине 70-х годов были приняты на вооружение активные ГАС с опускаемой антенной МГ-329 (НК, вертолеты), МГ-339 (НК), МГ-349 (НК, вертолеты), ГАС для вооружения НК МГ-342, ГАС обнаружения ПДСС МГ-7, а в 1976 году – ГАК для вооружения ПЛ МГК-400 и первый отечественный ГАК для вооружения НК МГК-335 (с активными трактами ЭП и связи).

При создании активных трактов ГАК и ГАС МГ-342 основные усилия были сосредоточены на увеличении акустической мощности излучаемых сигналов. В 1979 году принят на вооружение ГАК НК МГК-345 с активным трактом ЭП.

В начале 80-х годов начался новый этап развития гидроакустических средств, который ознаменовался приемом на вооружение кораблей ВМФ СССР аналого-цифровых ГАК (МГК-355 (НК) с активными трактами ЭП, КДСЦ, ОТ (обнаружение торпед) и СО (связь и опознавание) и МГК-500 (ПЛ), МГК-520 (ПЛ) с активными трактами гидролокации ГЛ и СО). ГАК МГК-355 и по настоящее время обладает наибольшим энергетическим потенциалом среди всех ГАК НК. В данном комплексе впервые реализована косвенная система стабилизации ХН (характеристики) на качке. На базе тракта ОТ ГАК МГК-355 в дальнейшем была создана ГАС ОТ МГ-355ТА (1986 г).

В конце 80-х начале 90-х годов на вооружение кораблей ВМФ СССР и РФ начали поступать аналого-цифровые ГАС миноискания МГ-99 (НК), ГАС обнаружения ПДСС МГ-717, МГ-737, МГ-747 и первые отечественные цифровые ГАК МГК-365 (НК), МГК-369 (НК), ГАК «Звезда-2» (НК) с активными режимами ГЛ и СО, МГК-540 (ПЛ) с активными трактами ГЛ и СО. Особенностью ГАК МГК-365, МГК-369 и «Звезда-2» являлось конструктивное оформление УГ и ФС режима ГЛ в виде отдельного тракта генерации сигналов (ТГС).

С распадом СССР основные усилия по развитию активных гидроакустических средств для ВМФ РФ были сосредоточены в рамках созданного концерна «Океанприбор», ЗАО «Аквамарин» и ЦНИИ «Гидроприбор».

Начиная с середины 90-х годов на вооружение кораблей ВМФ РФ последовательно были приняты цифровые ГАС и ГАК нового поколения ГАС миноискания МГ-89М, ГАС «Ливадия», ГАС обнаружения ПДСС «Анапа-М», ГАК НК МГК-225-03 (с активными режимами ГЛ и СО), ГАК НК «Заря-2» (с активными режимами ГЛ и СО), ГАК НК МГК-365М (с активными режимами ГЛ и СО), активно-пассивная ГАС с ГПБА «Минотавр», ГАК ПЛ «Ли́ра» (с активными режимами ГЛ, миноискания и СО), ГАК ПЛ МГК-600 (с активными режимами ГЛ и СО). Современные цифровые ГАК и ГАС обеспечивают работу режима ГЛ с использованием широкого выбора типов зондирующих сигналов (тональных, пачек разночастотных импульсов, сложных с различными видами ЧМ, шумоподобных и их комбинаций). Сами сигналы в большинстве случаев хранятся в библиотеке сигналов памяти ЦВК (ЦВС) в цифровом виде, при этом отпадает необходимость иметь в составе ГАК и ГАС специальных генераторов сигналов. Ведутся работы по внедрению цифровых усилителей мощности.

---

---

# I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОАКУСТИКИ

---

---

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОАКУСТИКИ. ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРЯ КАК НЕОДНОРОДНОЙ ЗВУКОПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ

---

---

### 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

---

---

#### 1.1.1. Основные определения гидроакустического поля

В целом можно дать следующее определение гидроакустики.

*Гидроакустика – область акустики, рассматривающая излучение, прием и распространение акустических волн в водной среде.*

Исключительное значение гидроакустики. определяется тем, что звуковые волны являются единственным видом волнового процесса, который может распространяться в водной среде с относительно малым поглощением, а, следовательно, при соответствующей мощности излучателя на большие расстояния. На этом основана разнообразная гидроакустическая аппаратура, широко используемая как в военной области, а именно: при решении задач обнаружения, классификации подводных объектов, в морской навигации, подводной связи, так и в гражданской: рыбопоисковой разведке, проведении многих океанологических исследований, во многих сферах деятельности по освоению богатств дна Мирового океана. Вместе с тем, распространение звуковых волн в водной среде обусловлено многочисленными факторами, создающими специфические только для гидроакустики явления и процессы (рефракция, звуковой канал, реверберация и др.), либо общие для каждой среды, но имеющие особенности (шумы, помехи, влияние канала распространения на сигнал и т.д.). Гидроакустику считают относительно молодой отраслью знания. Но если обратиться к истории, то становится очевидным, что это не совсем соответствует истине, хотя именно в последние годы гидроакустика достигла наибольшего расцвета.

Расцвет гидроакустики вызван следующими факторами:

- *новой элементной базой;*
- *применением новых технологий;*
- *внедрением цифровых методов обработки гидроакустических сигналов.*

При этом, резко возросли возможности гидроакустики:

- *расширилась и сферы ее применения,*
- *на более высокую ступень поднялись научные исследования,*
- *появились перспективные разделы дискретной гидроакустики и т.д.*

Применение гидроакустики тесно связано с изучением океана и, в частности, гидродинамики, океанологии и требует серьезной математической подготовки в таких областях как: функциональный анализ, математическая физика, теории вероятности и математическая статистика, вычислительная математика, интегральные преобразования и т.д. Кроме того, для глубокого понимания гидроакустики и ее прикладных аспектов необходимо знание смежных с гидроакустикой предметных областей: радиолокация, статистическая радиотехника и статистическая радиофизика, теория принятия решений, теория оптимизации и т.д.

Океаническая среда является сложной и очень динамической системой, тесно связанной с климатическими явления в атмосфере, характером дна и сейсмическими процессами, протекающими в толще земная кора. Поэтому задача описания распространения гидроакустического сигнала является очень сложной, как с точки зрения математического описания, так и реализации методов оптимальной обработки. Поэтому для лучшего понимания процессов влияющих на распространение сигнала, необходимо придерживаться принципа «от простого к сложному».

Рассмотрение физической природы акустического поля необходимо начать на примере *идеальной среды*.

**Определение 1.1.1а.** *Среду называют идеальной, если ее свойства неизменны в пространстве и во времени, а границы удалены настолько, что их влиянием можно пренебречь (безграничная среда), а механические потери отсутствуют (среда не поглощающая).*

**Определение 1.1.1б.** *Идеальная среда – сплошная среда, внутренним трением и теплопроводностью которой можно пренебречь.*

В идеальной среде существует только продольная звуковая волна, причем частицы такой среды в плоскости звуковой волны смещаются вдоль направления распространения волны. Далее эти ограничения будут ослаблены или заменены, на более реальные, но первоначально они представляют собой важные упрощения для вывода распространения акустических волн распределения акустических характеристик во времени и пространстве.

Надо отличать понятия *идеальная среда* и *идеальная жидкость*.