

---

---

# ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО. АКУСТИКА

---

---

УДК 534.222:629.127.4

**Р.Н. Алифанов<sup>1</sup>, И.А. Алифанова<sup>1</sup>, М.В. Мироненко<sup>2</sup>, А.С. Шмаков<sup>3</sup>, П.А. Стародубцев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

<sup>2</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований  
Дальневосточного отделения Российской академии,  
693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25

<sup>3</sup>Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия  
имени адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал, Владивосток),  
690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ СПОСОБА И СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РАЗМЕРОМЕТРИИ

*Приводятся результаты экспериментальных исследований закономерностей рассеяния на морских объектах падающего акустического поля, измерения пространственной амплитудно-фазовой структуры его теневой (дифракционной) составляющей. Показана возможность практической реализации рассмотренной закономерности в создании способа дистанционной гидроакустической размеромерии. Приводится пример экспериментальной проверки разработанного способа в гидроакустическом бассейне. Обосновывается возможность создания протяженной просветной системы гидроакустической размеромерии.*

**Ключевые слова:** гидроакустическая размеромерия, многолучевость распространения сигналов, структура дифракционного поля, флюктуация амплитуды.

**R.N. Alifanov, I.A. Alifanova, M.V. Mironenko, A.S. Shmakov, P.A. Starodubtcev**  
**EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF METHOD**  
**AND SYSTEM FOR REMOTE HYDROACOUSTIC RAZMEROMETRII**

*This research paper presents the results of experimental studies of the scattering patterns on offshore incident acoustic field measurement of the amplitude and phase of the spatial structure of its shadow (diffraction) component. The possibility of practical implementation of laws considered to provide a method of remote sonar razmerometrii. Is an example of an experimental verification of the developed method in a hydroacoustic pool. The possibility of creating an extended luminal sonar system razmerometrii.*

**Key words:** hydroacoustic razmerometriya, multipath propagation, the structure of the diffraction field amplitude fluctuation.

**Структура приемоизлучающих трактов и методика экспериментальных исследований в гидроакустическом бассейне**

Экспериментальные исследования пространственной структуры дифракционного поля за экранами выполнялись в гидроакустическом бассейне размером 15,0·6,5·6,0 м<sup>3</sup>. Измерения проводились в соответствии с принципами физического моделирования гидроакустических процессов [1] при величине коэффициента подобия (моделирования), равной 100. С помощью специально изготовленных устройств в бассейне перемещались акустические экраны различной конфигурации и различного материала. Измерялась пространственная структура

поля в зависимости от различных факторов: частоты и ширины полосы частот сигнала, размеров экрана и наличия многолучевости распространения сигналов [1, 2].

Схема проведения эксперимента в бассейне приведена на рис. 1, где  $r_1$ ,  $r_2$  – расстояния, определяющие положения экрана между излучателем и приемником сигналов;  $d$  – диаметр экрана (шара). Измерения проводились с помощью стационарно оборудованного в бассейне гидроакустического комплекса, представляющего собой два независимых приемных тракта и мощный (до 5 кВт) излучающий тракт. Диапазон излучаемых частот составлял от 50 до 650 кГц. Измерения выполнялись в непрерывном и импульсном режимах излучения с временным разделением приходов путем стробирования. Применялись тональные и широкополосные сигналы. Режимы излучения и приема задавались непосредственно с пульта измерительного комплекса.

Эксперимент выполнялся следующим образом (рис. 1). Направленный излучатель Изл. и ненаправленный приемник Пр. располагали на расстоянии 1 м от противоположных стенок «заглушенного» бассейна, что соответствовало расстоянию между ними 14 м. Затем с помощью экранов пересекали и экранировали пути распространения сигналов от излучателя к приемнику и регистрировали изменения пространственных характеристик (амплитуды и фазы) установившегося акустического поля. Акустические экраны подвешивали на капроновой нити, уравнивали грузом и с помощью специально изготовленного электромеханического привода со скоростью, не превышающей нескольких миллиметров в секунду, равномерно перемещали сверху вниз и обратно.

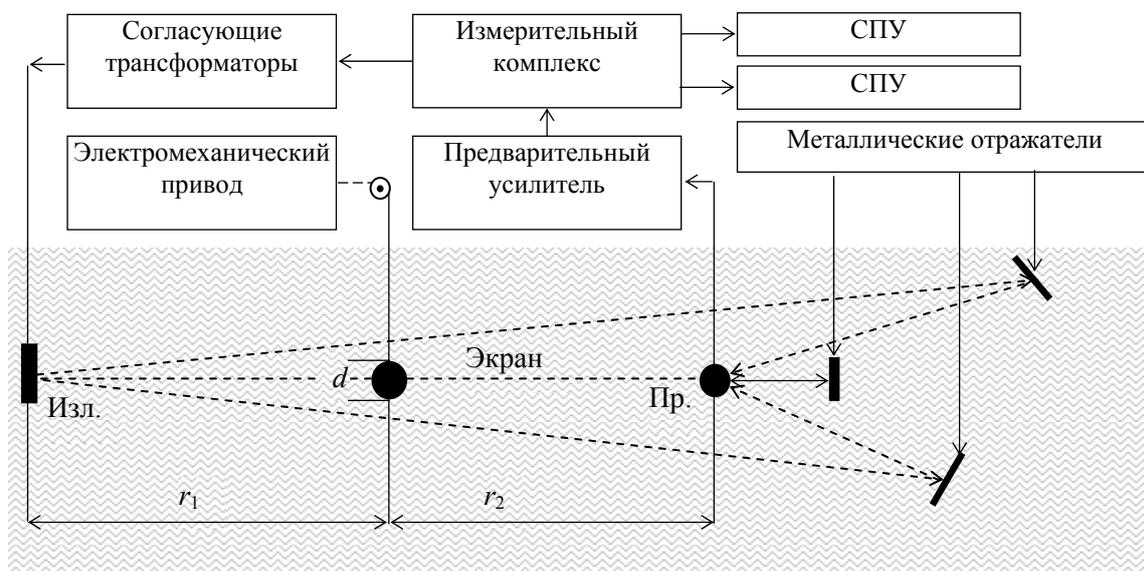


Рис. 1. Схема проведения эксперимента в гидроакустическом бассейне  
 Fig. 1. The scheme of the experiment in the pool hydroacoustic

### Результаты экспериментальных исследований структуры дифракционного поля за экранами

При проведении модельных экспериментальных исследований были получены пространственные характеристики дифракционного поля сигналов, частотные характеристики (в зависимости от частоты и ширины полосы частот сигналов подсветки), а также структура дифракционного поля в условиях моделируемой многолучевости распространения сигналов в среде. Результаты исследований пространственной амплитудно-фазовой структуры дифракционного поля приведены на рис. 2-4.

На рис. 2 – пространственная структура дифракционного поля (записи уровня непрерывных тональных сигналов) между излучателем и приемником. Частота сигналов 20 кГц,  $h_1, h_2$  – расчетные значения радиусов первой и второй зон Френеля, экран – эбонитовый шар диаметром 10 см с пластилиновым покрытием. Записи уровней сигналов сделаны в точках с интервалом 1 м по расстоянию.

На рис. 3 – пространственная структура поля сигналов для экранов различной протяженности, которая изменялась посредством увеличения набора пенопластовых дисков. Частота сигналов 230 кГц.

На рис. 4 – частотная зависимость структуры дифракционного поля тональных сигналов. Экран – эбонитовый шар диаметром 10 см с пластилиновым покрытием, расположен между точками излучения и приема ( $r_1 = r_2 = 7$  м).

Все записи структуры дифракционного поля получены с помощью СПУ в линейном масштабе записи 10-110 мВ. Эксперимент показал, что направленность излучения сигналов (при условии заглушенности бассейна и отсутствия отражения от стенок) затрудняет возможность поддержания постоянного уровня сигнала и регистрацию изменений сигнала за счет экранирования объектом. Регистрация изменений сигнала за счет экранирования объектом при ненаправленном облучении среды более эффективна.

Анализируя приведенные на рис. 2-4 результаты эксперимента, отметим следующее.

Пространственная структура дифракционного поля за экранами хорошо согласуется с теоретической структурой поля между точками излучения и приема и формируется в соответствии с закономерностями зон Френеля [1]. Количество регистрируемых зон Френеля возрастает с увеличением степени монохроматичности сигнала, а их пространственная протяженность увеличивается с возрастанием длины падающей на экран звуковой волны. Структура поля и размер зон Френеля проявляется в соответствии с известной зависимостью [2]

$$h_n = \left[ \frac{r_1 r_2 \lambda n}{(r_1 + r_2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $h_n$  – радиус  $n$ -й зоны Френеля;  $\lambda$  – длина волны сигнала подсветки;  $r_1, r_2$  – расстояния, определяющие положение экрана между излучателем и приемником;  $n$  – номер зоны.

При этом последовательное экранирование зон Френеля сопровождается периодичностью изменения уровня регистрируемого сигнала. Амплитуда и период излучения увеличиваются с приближением экрана к первой зоне, где спад уровня сигнала (рис. 2). Глубина спада (затенения) сигнала в основном определяется степенью экранирования первой зоны, ширина – пространственной протяженностью первой зоны в точке пересечения экраном, а в случае, когда размер экрана превышает размер пересекаемого участка зоны Френеля, ширина и глубина спада уровня сигнала определяются также величиной указанного повышения (рис. 3) [2].

В момент затенения сигналов движущимся экраном одновременно с изменением амплитуды сигнала наблюдается изменение (скачок) фазы. Общее изменение фазы в момент затенения сигнала характеризуется возрастанием флюктуаций. Замечено также, что структура дифракционного поля на импульсных сигналах существенного отличия от записей сигналов в непрерывном режиме излучения тональных сигналов не имеет, так как в условиях «заглушенного» бассейна отражения от его стенок на частотах сигналов 230-500 кГц практически отсутствовали. Преимущество импульсного режима работы с использованием временного разделения приходов путем стробирования наблюдается в условиях многолучевого распространения сигналов.

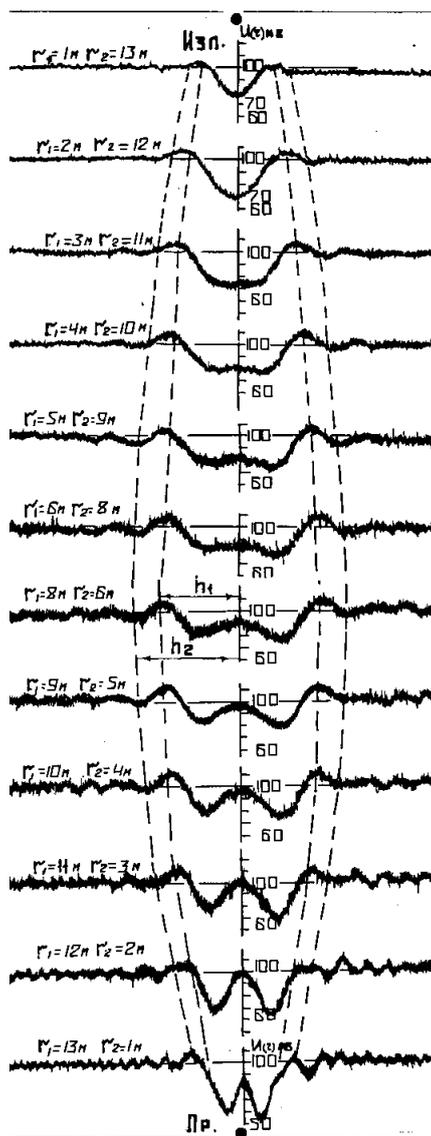


Рис. 2. Пространственная структура «акустической тени» между излучателем и приемником  
 Fig. 2. Spatial structure of «acoustic shadow» between transmitter and receiver

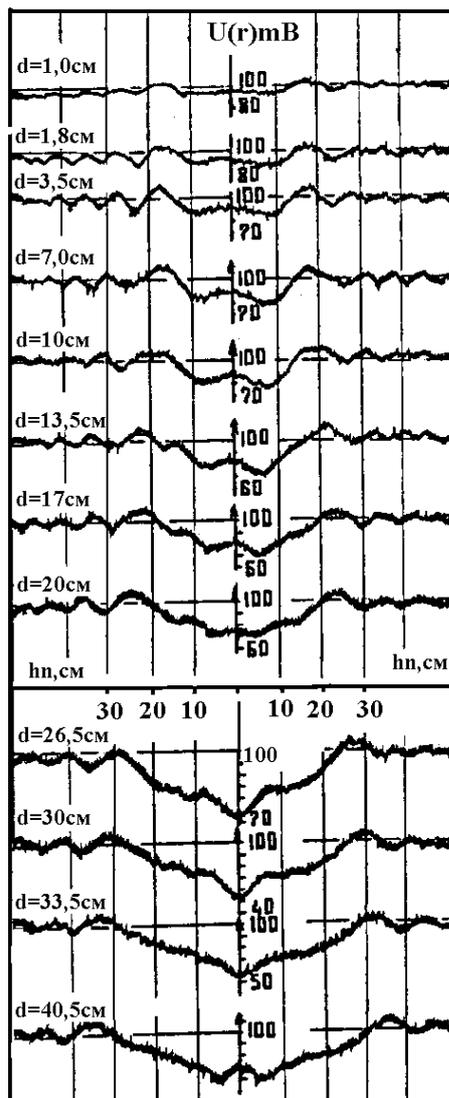


Рис. 3. Структура «акустической тени» за экранами различной протяженности  $d$   
 Fig. 3. The structure of the «acoustic shadow» behind screens of varying length  $d$

Для обоснования практических возможностей регистрации подводных объектов дифракционным методом в условиях многолучевости распространения сигналов эксперимент в гидроакустическом бассейне был специальным образом усложнен. Многолучевость распространения сигналов в бассейне создавалась с помощью установленных отражателей (см. рис. 1).

Экспериментальными исследованиями устойчивости пространственной структуры дифракционного поля в условиях многолучевости распространения сигналов показано, что искажение сигналов экранами по отдельным лучам сопровождается соответствующими изменениями в суммарном многолучевом сигнале. Т.е. для устойчивой регистрации признаков затенения сигналов экраном необходимо их пространственно-временное разделение, что выполнялось методом «стробирования» импульсов.

Анализ результатов эксперимента показал следующее. Структура суммарного многолучевого сигнала изменяется в соответствии с моментами пересечения каждого отдельного луча и степенью его экранирования объектом. Наличие в точке приема дополнительных (помеховых) сигналов, обусловленных многолучевостью распространения, существенно искажает четкость структуры звуковой тени, не исключает возможность обнаружения объекта по закономерностям дифракции. В этом случае увеличивается амплитуда флюктуаций уровня суммарного сигнала, обусловленная интерференцией отдельных приходов. Т.е. в дифракционной системе обнаружения целесообразно осуществлять временное разделение многолучевого сигнала и раздельную регистрацию наиболее энергонесущих приходов сигнала по лучам.

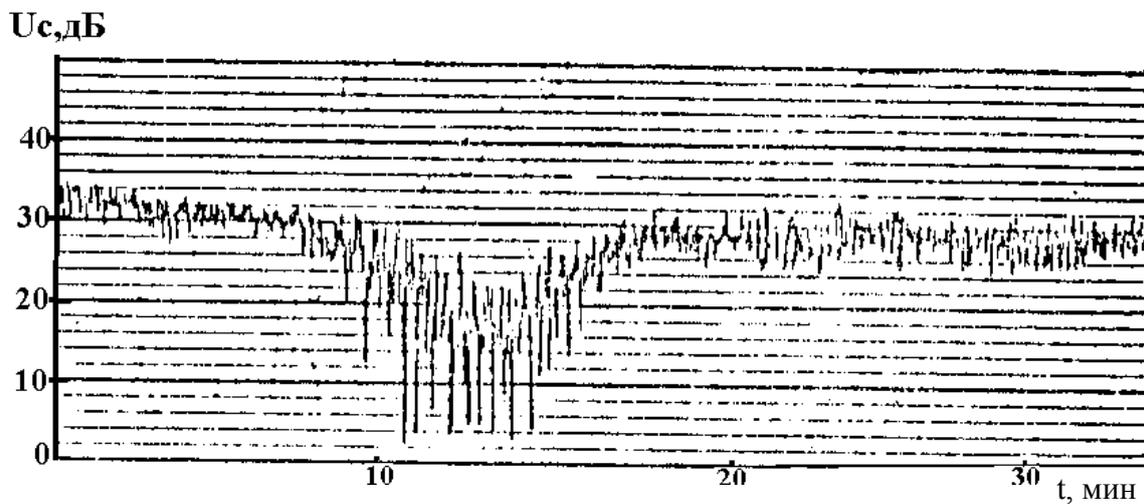


Рис. 4. Флюктуации амплитуды просветных сигналов, искаженных изменяющимся состоянием физического явления (протяженность расположения приемных пассивных элементов 10 км)

Fig. 4. Fluctuation amplitude signals distorted luminal changes the state of a physical phenomenon (the length of the receiving passive elements 10 km)

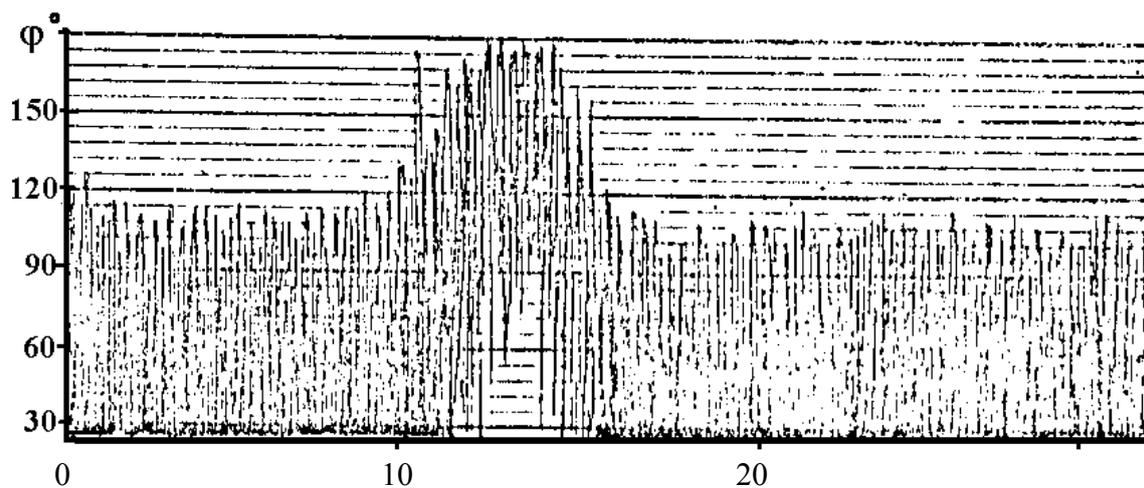


Рис. 5. Флюктуации фазы искаженных просветных сигналов, искаженных изменяющимся состоянием физического явления (протяженность расположения приемных пассивных элементов 10 км)

Fig. 5. Phase fluctuations distorted luminal signals distorted changing state of physical phenomena (the length of the receiving passive elements 10 km)

### Способ и система дистанционной гидроакустической размеромерии

Проведенные в гидроакустическом бассейне исследования зависимости пространственной протяженности звуковой тени от размера экрана  $d$  позволили получить функцию, представленную на рис. 6. Из нее видно, что при постоянном значении падающей на экран длины волны и фиксированном расстоянии между точками излучения – приема сигналов, а также известном положении объекта между ними половина протяженности акустической тени останется неизменной до момента равенства величины протяженности экрана радиусу первой зоны Френеля регистрации сигнала. С момента перекрытия размером экрана радиуса первой зоны Френеля протяженность акустической тени увеличивается (до определенных пределов) пропорционально этому превышению. На рис. 6 видно, что точка излома функции

$$h/2 = f(d) \tag{2}$$

соответствует моменту равенства размера экрана в плоскости его перемещения пространственному размеру радиуса первой зоны Френеля. Полученная при проведении исследований закономерность использована при разработке способа, позволяющего дистанционно измерить недоступные для контактных измерений подводные объекты. Сущность таких измерений объясняется следующим образом.

При постоянном размере экрана и приближенно известной геометрии расположения его между точками излучения и приема, последовательно изменяя длину волны падающего на экран сигнала, можно определить то значение длины волны (частоты сигнала), при которой начинается увеличение протяженности ширины зоны  $h$ , что будет соответствовать моменту превышения ширины первой зоны Френеля протяженности экрана. Точное значение этой длины волны может быть определено по частоте сигнала в точке характерного излома функции (рис. 7)

$$h = f(f) \tag{3}$$

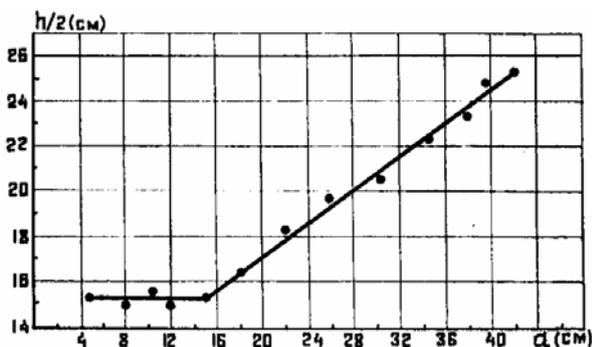


Рис. 6. Зависимость протяженности «акустической тени» от размера экрана  
Fig. 6. Dependence length «acoustic shadow» on the screen size

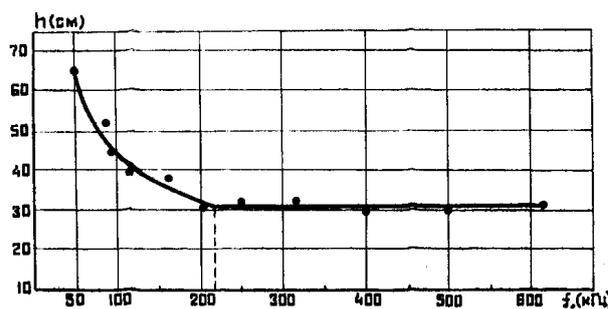


Рис. 7. Зависимость протяженности «акустической тени» от частоты сигнала  
Fig. 7. Dependence length «acoustic shadow» on the signal frequency

При этом протяженность акустической тени  $h$  может быть измерена как относительная величина (без учета скорости перемещения излучателя и приемника относительно измеряемого объекта). Определив зафиксированное в точке перегиба функции значение частоты сигнала и поставив соответствующее ей значение  $\lambda$ , а также ориентировочно известные рас-

стояния от объекта до излучателя и приемника ( $r_1$  и  $r_2$ ), протяженность профиля объекта в заданной плоскости рассчитаем по известной формуле, выражающей размер радиуса первой зоны Френеля:

$$d = h = \sqrt{\frac{r_1 r_2 \lambda}{r_1 + r_2}}. \quad (4)$$

На практике трудно измерить объект, размеры которого не известны хотя бы в заданном интервале. Это связано с тем, что необходимо излучение сигналов с неопределенной шириной полосы частоты. По этой причине измерению подлежат объекты, ориентировочные размеры которых известны в заданных пределах. Среднюю частоту излучаемых сигналов  $f_{cp}$  можно определить из соотношения (4), заменив в нем истинный размер объекта  $d$  на предполагаемый  $d_n$ , а также приняв  $r_1 = r_2 = r$  (при измерениях объект можно ориентировать посередине гидроакустической линии):

$$\lambda_{cp} = \frac{d_n^2 (r_1 + r_2)}{r_1 r_2} = \frac{d_n^2 2r}{r^2} = \frac{2d_n^2}{r}; \quad f_{cp} = \frac{C}{\lambda_{cp}} = \frac{Cr}{2d_n^2}. \quad (5)$$

Введем коэффициент  $k_d$ , определяющий заданный интервал возможных размеров объекта и коэффициент  $k_{\Delta f}$ , определяющий ширину полосы анализа принимаемых сигналов (полосу фильтров). С учетом  $k_d$  заданный интервал размеров вероятного объекта запишется в виде  $d_n(1 \pm k_d)$ , а интервал изменения средней частоты принимаемых сигналов –  $f_{cp}(1 \pm k_{\Delta f})$ . С учетом этих интервалов верхнее и нижнее значения частоты излучаемых сигналов можно представить следующим образом:

$$f_e = (1 + k_{\Delta f}) \frac{Cr}{2d_n^2 (1 - k_d)^2}; \quad f_n = (1 - k_{\Delta f}) \frac{Cr}{2d_n^2 (1 + k_d)^2}. \quad (6)$$

Ширина полосы излучаемых сигналов при регистрации и измерении объекта может быть определена соотношением

$$\Delta f - (f_n \div f_e) = \left[ \frac{1 - k_{\Delta f}}{(1 + k_d)^2} \div \frac{1 + k_{\Delta f}}{(1 - k_d)^2} \right] \frac{Cr}{2d_n^2}, \quad (7)$$

где  $k_d$  – коэффициент, определяющий заданный интервал возможных размеров вероятного объекта;  $k_{\Delta f}$  – коэффициент, определяющий ширину полосы анализа (полосу применяемых фильтров);  $C$  – скорость звука в воде;  $r$  – половина расстояния между точками излучения и приема;  $d_n$  – предполагаемый (в заданном интервале) размер объекта.

Структурная схема гидроакустической системы, реализующей способ дистанционного измерения размеров неподвижных подводных объектов, приведена на рис. 8. Порядок измерения с помощью предложенной системы заключается в следующем.

Контролируемый участок водной среды находится между излучателем и приемником акустических колебаний. С помощью блока 1 формируют импульсные широкополосные сигналы, через блок усиления мощности сигналов 2 подают их на излучатель 3, облучают контролируемый участок среды и объект. Принятые приемником теневого сигнала 4 импульсы

усиливают блоком широкополосного усилителя 5, расфильтровывают их блоком узкополосных фильтров 6, уравнивают расфильтрованные сигналы по амплитуде с помощью первого многоканального блока коррекции уровней 7 (корректируют частотную погрешность трактов при отсутствии объекта).

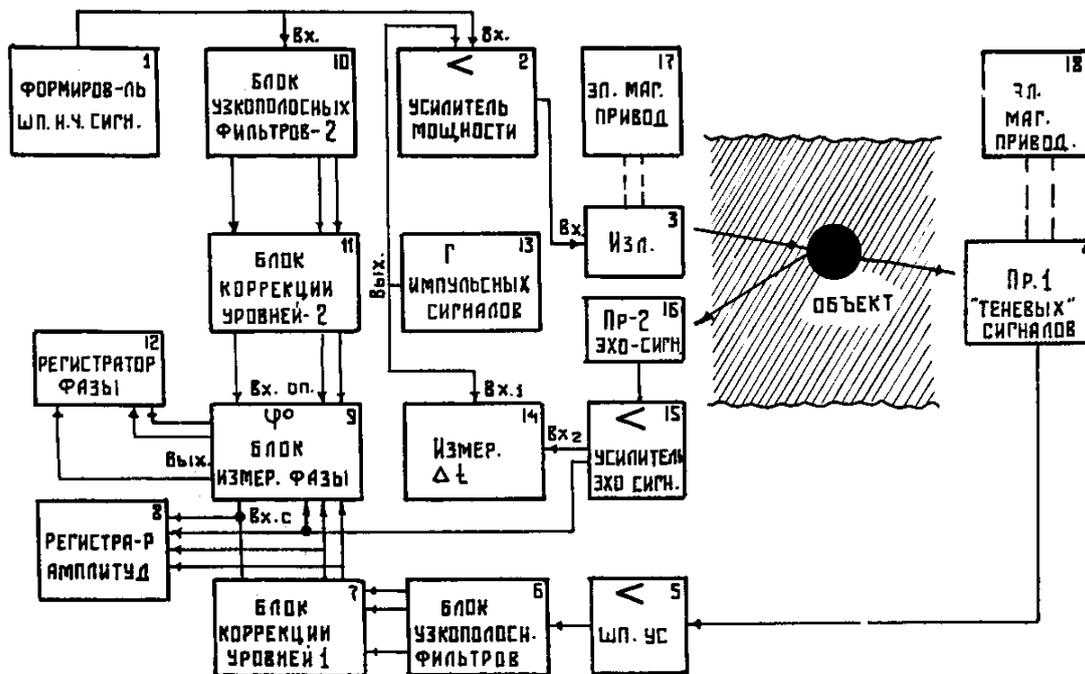


Рис. 8. Структурная схема системы реализации способа гидроакустической размеромерии  
 Fig. 8. Block diagram of system implementation method sonar razmerometrii

Далее принятые и расфильтрованные сигналы подают на многоканальный самописец (регистратор уровней) 8, а также на сигнальный вход фазометра 9. Опорный вход фазометра 9 через второй блок коррекции уровней 2 и далее через второй блок узкополосных фильтров 10 подключен к формирователю широкополосных сигналов 1. Выходы многоканального блока измерения фаз 9 подсоединены ко второму многоканальному самописцу 12 (регистратору фаз). Генератор импульсных сигналов 13 и измеритель временных интервалов 14 позволяет в случае необходимости уточнить положение объекта между излучателем и приемником сигналов. Блоки электромеханических приводов 17, 18 необходимы для синхронного перемещения приемной и излучающей систем при измерении неподвижного объекта. В случае измерения подвижных объектов блоки 17 и 18 не используются. По измеренным и зарегистрированным многоканальными самописцами спадам уровней затененных объектом сигналов, а также скачкам сигналов фазы строят функцию  $h = f(d)$ , определяют значение длины волны в характерной точке изгиба функции, которое используется в дальнейших вычислениях размера объекта  $d$  в соответствии с зависимостью (4). Положение объекта в случае необходимости уточняется путем измерения временного интервала между излученным и отраженным от объекта высокочастотным эхо-сигналом с помощью блоков 13, 14.

Рассмотренным способом был измерен экран (цилиндр) в условиях гидроакустического бассейна. Водную среду облучали сигналами в полосе 50-650 кГц. Измеренная обычным метрическим способом высота цилиндра составляла 15 см, расстояния от объекта до излучателя и приемника сигналов – 7 м. Полученная путем измерений функциональная зависимость

приведена на рис. 6, из которой видно, что частота сигнала в точке характерного изгиба функции составляет 215 кГц, что соответствует длине волны в воде 0,7 см, а протяженность (высота) цилиндра в плоскости измерения составляет 15,6 см. Погрешность серии измерений не более 4 %.

Аналогичные измерения были проведены и в условиях опытового морского поля [2].

Следует отметить, что рассмотренный способ позволяет измерять объекты, не изменяющие акустических свойств среды, например, за счет внутренних волн, возникающих в результате его движения в водной среде. Применение разработанного способа для дистанционного измерения реальных объектов требует дальнейшей разработки и, прежде всего, разделения влияния на сигнал от объекта и возмущенной области за объектом. Измерение малогабаритных объектов на небольших дистанциях, например, проведение контроля качества гидротехнических сооружений разработанным способом может проводиться уже в настоящее время.

### Список литературы

1. Савельев И.В. Дифракция света: Курс общей физики. – М.: Наука, 1971. – С. 106-155.
2. Матвеев В.Н., Мацевич Э.В. Контроль состояния подводных частей морских гидротехнических сооружений дифракционным гидроакустическим методом // Проблемы исследования и освоения Мирового океана: сб. докл. IV конф. – Владивосток: ДВПИ, 1983. – С. 199-201.
3. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Теоретические и экспериментальные исследования пространственной амплитудно-фазовой структуры дифракционного поля за акустическими экранами и неоднородностями морской среды // Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды. – Владивосток: СКБ САМИ ДВО РАН, 2006. – С. 44-57.
4. Способ дистанционной гидроакустической размеромерии: а.с. СССР № 223207 / М.В. Мироненко, Н.А. Клименко, заявл. от 01.08.1985.
5. Мироненко М.В., Паренский А.И. Контроль размеров акустических экранов дифракционным методом // Сб. докл. 4-й ДВ акустической НТК. – Владивосток: ДВПИ, 1986. – С. 120-122.
6. Мироненко М.В., Клименко Н.А., Рокотов С.П. К вопросу акустического контроля размеров экранов дифракционным способом // Сб. докл. 4-й ДВ акустической НТК. – Владивосток: ДВПИ, 1986. – С. 142-144.

**Сведения об авторах:** Алифанов Роман Николаевич, кандидат технических наук, e-mail: gidra\_518@mail.ru;

Алифанова Ирина Анатольевна, e-mail: shira\_83@mail.ru;

Мироненко Михаил Владимирович, ведущий сотрудник, доктор технических наук, профессор, e-mail: professor@mail.primorye.ru;

Шмаков Андрей Станиславович, кандидат технических наук, доцент;

Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: spa1958@mail.ru.

УДК 534.231.1

**С.М. Балабаев, Н.Ф. Ивина**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКИХ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН  
ЖИДКОГО ОДНОРОДНОГО ВОЛНОВОДА**

*Рассмотрены дисперсионные уравнения нормальных волн жидкого однородного волновода с жидким и твердым дном. Рассчитаны дисперсионные зависимости действительной и мнимой составляющих безразмерного волнового числа нормальных волн однородного волновода с твердым дном.*

**Ключевые слова:** дисперсионные уравнения, однородный волновод, нормальные волны.

**S.M. Balabaev, N.F. Ivina****CALCULATION OF ACOUSTIC NORMAL WAVES  
OF LIQUID HOMOGENEOUS WAVEGUIDE**

*The dispersion equations of normal waves of liquid homogeneous waveguide with liquid and solid bottom are considered. Dispersion dependences of the real and imaginary components of the dimensionless wave number of normal waves of homogeneous waveguide with a solid bottom are calculated.*

**Key words:** dispersion equations, homogeneous waveguide, normal waves.

При работе любых гидроакустических систем (определение дальности, глубины, осуществление связи между объектами, поиск рыбных косяков и т.п.) принятая информация обрабатывается в предположении, что вода является бесконечной и однородной, т.е. что в ней распространяется только продольная волна с постоянной скоростью. Но из-за отражений волны от морского дна и границы с воздухом ситуация принципиально меняется. В такой системе (гидроакустическом волноводе) существуют нормальные волны (моды). Классические задачи анализа волноводов рассмотрены в известных монографиях [1, 2]. Целью данной статьи является расчет дисперсионных зависимостей действительной и мнимой составляющих волнового числа нормальных волн однородного волновода с твердым дном, которые в указанных монографиях не рассматривались.

Рассмотрим жидкий волновод толщиной  $h$ , лежащий на жидком или твердом полупространстве. Жидкому полупространству приближенно соответствует морское дно из осадочных пород, а твердому – скальный грунт. Плотность жидкости (среда 1)  $\rho$ ,  $c_0$  – скорость звука в жидкости. Верхняя граница волновода ( $z = h$ ) свободна. Плотность дна (полупространства, среда 2)  $\rho_D$ ;  $c_l$  – скорость продольной волны,  $c_t$  – скорость поперечной волны. Необходимо рассчитать частотные зависимости действительной и мнимой составляющих волнового числа нормальных волн жидкого волновода.

Рассмотрим сразу волновод с твердым дном, так как все соотношения для волновода с жидким дном являются частным случаем при  $c_t \rightarrow 0$ . Введем скалярные и векторные потенциалы смещения:  $\varphi_1 = \varphi_1(x, z)$  – потенциал в жидкости,  $\varphi = \varphi(x, z)$  и  $\psi = \psi(x, z)$  ( $\psi(x, z) \equiv \psi_y(x, z)$ ) – для поля в твердом полупространстве.

Введенные потенциалы должны удовлетворять уравнениям Гельмгольца:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} + k_o^2 \varphi_1 &= 0, \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k_l^2 \varphi &= 0, \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_t^2 \varphi &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $k_o = \omega / c_o$ ,  $k_l = \omega / c_l$ ,  $k_t = \omega / c_t$ ,  $\omega$  – круговая частота и граничным условиям

$$\sigma_{zz}^{(1)} = 0, \text{ при } z = h; \begin{cases} \sigma_{xz}^{(2)} = 0, \\ \sigma_{zz}^{(1)} = \sigma_{zz}^{(2)}, \text{ при } z = 0, \\ u_z^{(1)} = u_z^{(2)}, \end{cases}\tag{2}$$

где  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{zz}$  – касательное и нормальное напряжения;  $u_z$  – нормальное к границе раздела смещение.

Выразим компоненту смещения и компоненты напряжений, которые понадобятся в дальнейшем, через потенциалы [3, 4]

$$\begin{aligned}u_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}, \\ \sigma_{xz} &= \mu \left( 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right), \\ \sigma_{zz} &= \lambda \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right),\end{aligned}\tag{3}$$

где  $\lambda$ ,  $\mu$  – упругие постоянные Ламе.

Будем искать решения уравнений (1) в виде плоских волн вдоль координаты  $x$ . Тогда эти решения можно записать в виде

$$\begin{aligned}\varphi(x, z) &= C_1(k) \exp(i(kx - bz)), \\ \varphi_1(x, z) &= (C_2(k) \cos az + C_3(k) \sin az) \exp(ikx), \\ \psi(x, z) &= C_4(k) \exp(i(kx - cz)),\end{aligned}\tag{4}$$

$k$  – волновое число,  $a = \sqrt{k_o^2 - k^2}$ ,  $b = \sqrt{k_l^2 - k^2}$ ,  $c = \sqrt{k_t^2 - k^2}$ .

Подставляя решения (4) в систему (2) с учетом соотношений (3), получим однородную систему уравнений

$$\begin{cases} C_2 \cos ah + C_3 \sin ah = 0, \\ ibC_1 + aC_3 - ikC_4 = 0, \\ 2bkC_1 + (k_t^2 - 2k^2)C_4 = 0, \\ \rho_1(2k^2 - k_t^2)C_1 + k_t^2C_2 + 2\rho_1ckC_4 = 0, \\ \rho_1 = \rho_0 / \rho. \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) имеет нетривиальное решение, если ее определитель равен нулю. Отсюда получим дисперсионное уравнение для волновода с твердым дном.

$$k^4 b \sin ah + i\rho_1 a \cos ah (4bck^2 + (2k^2 - k_t^2)^2) = 0.$$

Устремляя  $c_t$  к нулю, получим дисперсионное уравнение для волновода с жидким дном:

$$b \sin ah + i\rho_1 a \cos ah = 0. \quad (6)$$

Выбор ветви радикала  $a$  произволен, поскольку он не дает многозначности в полученных выражениях. Ветви радикалов  $b$  и  $c$  выбираются из условий  $\text{Im} b > 0, \text{Im} c > 0$ .

Рассмотрим дисперсионное уравнение (6) для волновода с жидким дном. Оно имеет простые корни  $k = \pm k_0$ , совпадающие с точками ветвления радикала  $a$ .

Характеристическая функция дисперсионного уравнения является двухзначной. Для того чтобы сделать ее однозначной, образуем двулистную поверхность Римана, проведя разрезы, как показано на рис. 1. Уравнения разрезов  $\text{Im} b = 0$ , уравнения продолжений разрезов  $\text{Re} b = 0$ . Разрезы изображены сплошной линией, а продолжения разрезов – штриховой. Для наглядности на рисунке учтены собственные потери. Будем считать, что на верхнем листе  $\text{Im} b > 0$ , а на нижнем –  $\text{Im} b < 0$ . На рис. 1 указаны также знаки  $\text{Re} b$  по координатным четвертям для верхнего листа; для нижнего листа знаки противоположны.

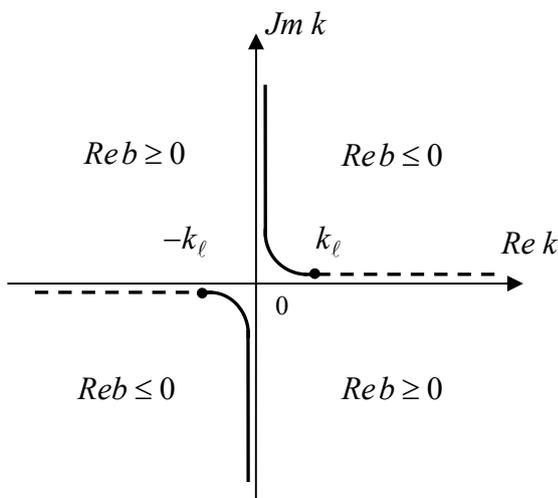


Рис. 1. Комплексная плоскость волновых чисел  
Fig. 1. Complex plane of wave numbers

Для составления компьютерной программы и расчета дисперсионных зависимостей необходимо знать, на каком листе двулистной поверхности Римана расположены комплексные корни дисперсионного уравнения. Анализ корней дисперсионного уравнения в комплексной

плоскости  $k$  затруднителен. Поэтому выполним анализ в комплексной плоскости  $\eta$ , а затем вернемся в плоскость  $k$ .

$$\eta = \sqrt{k_o^2 - k^2} h,$$

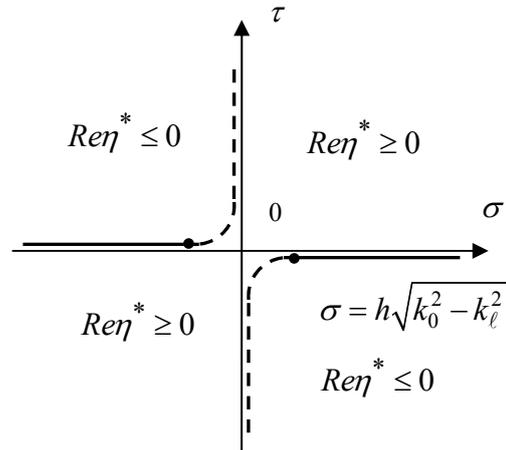
тогда 
$$b = \sqrt{\eta^2 - h^2(k_o^2 - k_l^2)} / h = \eta^* / h, \quad \eta^* = \sqrt{\eta^2 - h^2(k_o^2 - k_l^2)}.$$

Уравнение (6) преобразуем к виду

$$\eta^* = -i\eta\rho_1 \operatorname{ctg}\eta. \quad (7)$$

Полагаем  $\eta = \sigma + i\tau$ . Комплексная плоскость  $\eta$  изображена на рис. 2 (рисунок выполнен для случая  $c_l > c_o$ ). Уравнения разрывов  $\operatorname{Im}\eta^* = 0$ , уравнения продолжений разрывов  $\operatorname{Re}\eta^* = 0$ . На рис. 2 указаны также знаки  $\operatorname{Re}\eta^*$  для верхнего листа ( $\operatorname{Im}\eta^* > 0$ ).

Рис. 2. Комплексная плоскость  $\eta$   
Fig. 2. Complex plane  $\eta$



Разделяя действительную и мнимую части в уравнении (7), получим

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\eta^* &= \frac{\rho_1(\tau \sin 2\sigma - \sigma sh 2\tau)}{2(\sin^2 \sigma + sh^2 \tau)}, \\ \operatorname{Im}\eta^* &= \frac{-\rho_1(\sigma \sin 2\sigma + \tau sh 2\tau)}{2(\sin^2 \sigma + sh^2 \tau)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим расположение комплексных корней по четвертям. На верхнем листе в первой четверти  $\operatorname{Im}\eta^* > 0$ ,  $\operatorname{Re}\eta^* > 0$ . Из системы (8) получим

$$\begin{cases} \tau \sin 2\sigma - \sigma sh 2\tau > 0, \\ \sigma \sin 2\sigma + \tau sh 2\tau < 0. \end{cases} \quad (9)$$

В первой четверти  $\sigma > 0$ ,  $\tau > 0$ ,  $sh 2\tau > 0$ . При этих значениях  $\sigma$  и  $\tau$  система (9) несовместна, а следовательно, в первой четверти на верхнем листе нет комплексных корней. Аналогично рассмотрев три другие четверти, приходим к тому же выводу. Таким образом, ни в одной из четвертей верхнего листа нет комплексных корней.

Для нижнего листа в первой четверти  $\text{Im}\eta^* < 0, \text{Re}\eta^* < 0$ . Имеем систему

$$\begin{cases} \sigma \sin 2\sigma > -\tau sh 2\tau, \\ \tau \sin 2\sigma < \sigma sh 2\tau. \end{cases} \quad (10)$$

Система (10) имеет решения, следовательно, на нижнем листе в первой четверти есть комплексные корни. Аналогичная ситуация получается и для остальных четвертей.

Таким образом, все комплексные корни уравнения (7), а следовательно, и уравнения (6) расположены на нижнем листе; на этом листе  $\text{Im}b < 0$ . При решении задачи с точечным источником звука в волноводе эти корни будут задеты при вычислении поля боковой волны, которое определяется интегралом по берегам разреза, при деформировании контура интегрирования для вычисления интеграла асимптотическими методами. Итак, все комплексные корни соответствуют «квази модам», дающим нарастающее, но ограниченное поле при удалении от границы раздела.

Численные результаты представлены графиками частотных зависимостей (дисперсионными кривыми) действительной и мнимой составляющих безразмерного волнового числа для волновода с твердым дном – рис. 3. Действительная часть волнового числа изображена сплошной линией, а мнимая – штриховой; номера мод обозначены цифрами. Отношение плотности грунта к плотности жидкости равно 1,6.

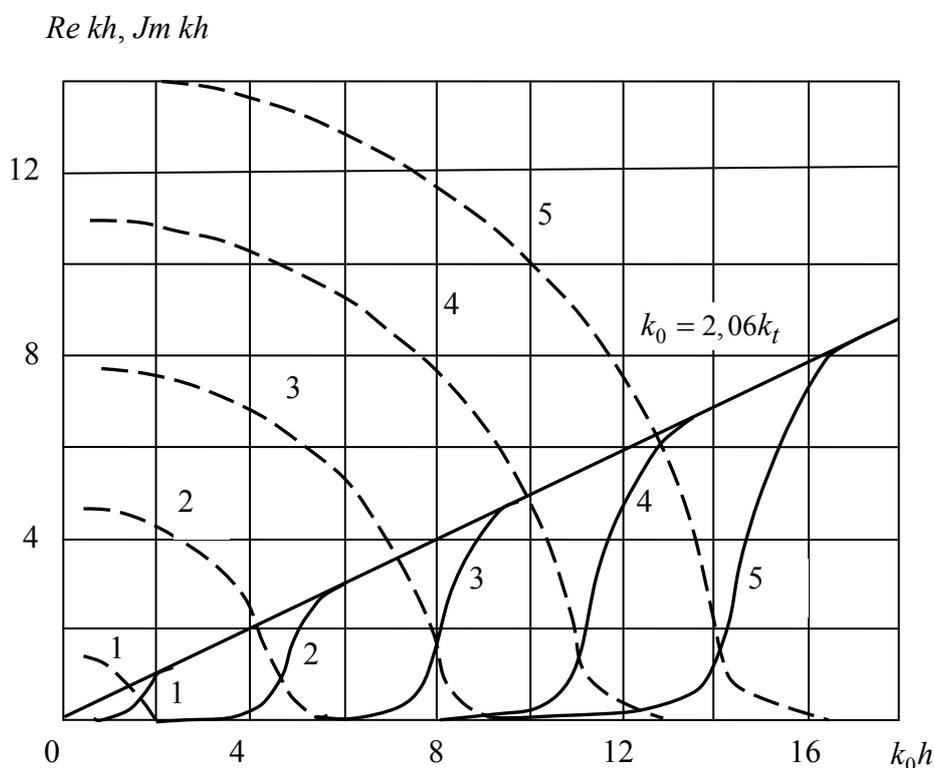


Рис. 3. Дисперсионные кривые безразмерного волнового числа для однородного волновода с твердым дном ( $c_l / c_o = 3,51, c_t / c_o = 2,06$ )

Fig. 3. The dispersion curves of the dimensionless wave number for homogeneous waveguide with a solid bottom ( $c_l / c_o = 3,51, c_t / c_o = 2,06$ )

В заключение отметим, что последние достижения в акустике слоистых сред с учетом обобщенных волн изложены в монографиях [5, 6].

### Список литературы

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 344 с.
2. Завадский В.Ю. Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах. – М.: Наука, 1972. – 558 с.
3. Новожилов В.В. Теория упругости. – Л.: Судпромгиз, 1958. – 370 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – Т. 7. – 203 с.
5. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Некорректные задачи и обобщенные волны в акустике слоистых сред. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 406 с.
6. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. – М.: Наука, 2009. – 496 с.

**Сведения об авторах:** Балабаев Сергей Михайлович,  
доктор физико-математических наук, профессор;  
Ивина Наталья Федоровна, доктор технических наук, доцент.

УДК 639.2.081.117

**В.В. Кудакаев, В.И. Габрюк**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**БАЗА ДАННЫХ РАСПОРНЫХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАСКРЫТИЯ УСТЬЯ ТРАЛОВ**

*Современные траловые системы являются сложным инженерным сооружением. Для их эффективного проектирования и моделирования нужно учитывать накопленную информацию о промысловых объектах и элементах траловой системы. Эту информацию необходимо собирать и структурировать в единые базы данных, чтобы потом на основе этих баз была возможность создавать компьютерные программы проектирования и моделирования траловых систем. В качестве примера представлена база данных распорных устройств горизонтального раскрытия тралов, которая может использоваться как в учебных целях при выполнении курсовых и дипломных работ, так и в промышленности при моделировании тралов с помощью программ расчета траловых систем.*

**Ключевые слова:** база данных, траловые доски, MS Access.

**V.V. Kudakaev, V.I. Gabruk****DATABASE: OTTER DEVICES FOR HORIZONTAL MOUTH  
OPENING OF THE TRAWL**

*Modern trawl systems are complicated engineering structures. For trawl design and modeling, we need to take into account the accumulated information about fishing objects and all units of the trawl. This information should be structured and collected into the common database, and later used in the trawl system design and modeling software. In this work presented a database: Otter devices for horizontal mouth opening of the trawl. This database could be used by fishing industry to develop a trawl designing software and for educational purposes.*

**Key words:** database, trawl, MS Access.

**Введение**

Конструкция рыболовного трала оказывает наибольшее влияние на эффективность его работы. Она должна подходить к облову того или иного вида гидробионтов в зависимости от характера их поведения и распределения в толще воды. Если промысловые характеристики тралов, отражающие степень приспособленности к облову объекта промысла, такие как уловистость, довольно сложно определить, то технические характеристики (прочность, геометрия и т.д.) могут быть довольно точно рассчитаны путем компьютерного моделирования. Поэтому при моделировании траловых систем необходимо принимать во внимание накопленные известные особенности поведения и распределения промысловых гидробионтов в зоне действия трала, а также технические характеристики всех элементов орудия лова, сведенные в базы данных. Такие базы данных позволят учитывать и накапливать известные особенности объектов промысла и элементов траловой системы при проектировании и моделировании новых высокоэффективных в эксплуатации тралов. Таким образом, можно выделить два направления создания баз данных, необходимых для создания высокоэффективных тралов:

- поведенческих характеристик объектов промысла (гидробионтов);
- технических характеристик элементов тралов.

### Объекты и методы исследования

Подобные базы данных и методика создания баз данных описаны в [1-3], но они являлись частью программного комплекса или программ для ЭВМ, что не дозволяло возможным делать выборки из них необходимых данных для расчетов. Поэтому на кафедре «Промышленное рыболовство» ФГБОУ ВПО «Дальрыбвтуз» разрабатываются серии баз данных по описанию технических характеристик элементов тралов. Одна из этих баз «DB-Doors» представлена в данной статье. Эта база создана с использованием СУБД MS Access 2013, что позволяет при помощи запросов делать выборку необходимых данных используемых на промысле распорных устройств.

База данных распорных устройств «DB-Doors» состоит из 5 таблиц, из них 3 основных таблицы и 2 таблицы, связывающие данные основных таблиц в соответствии с их идентификаторами (ключевыми полями). Схема этой базы данных представлена на рис. 1.

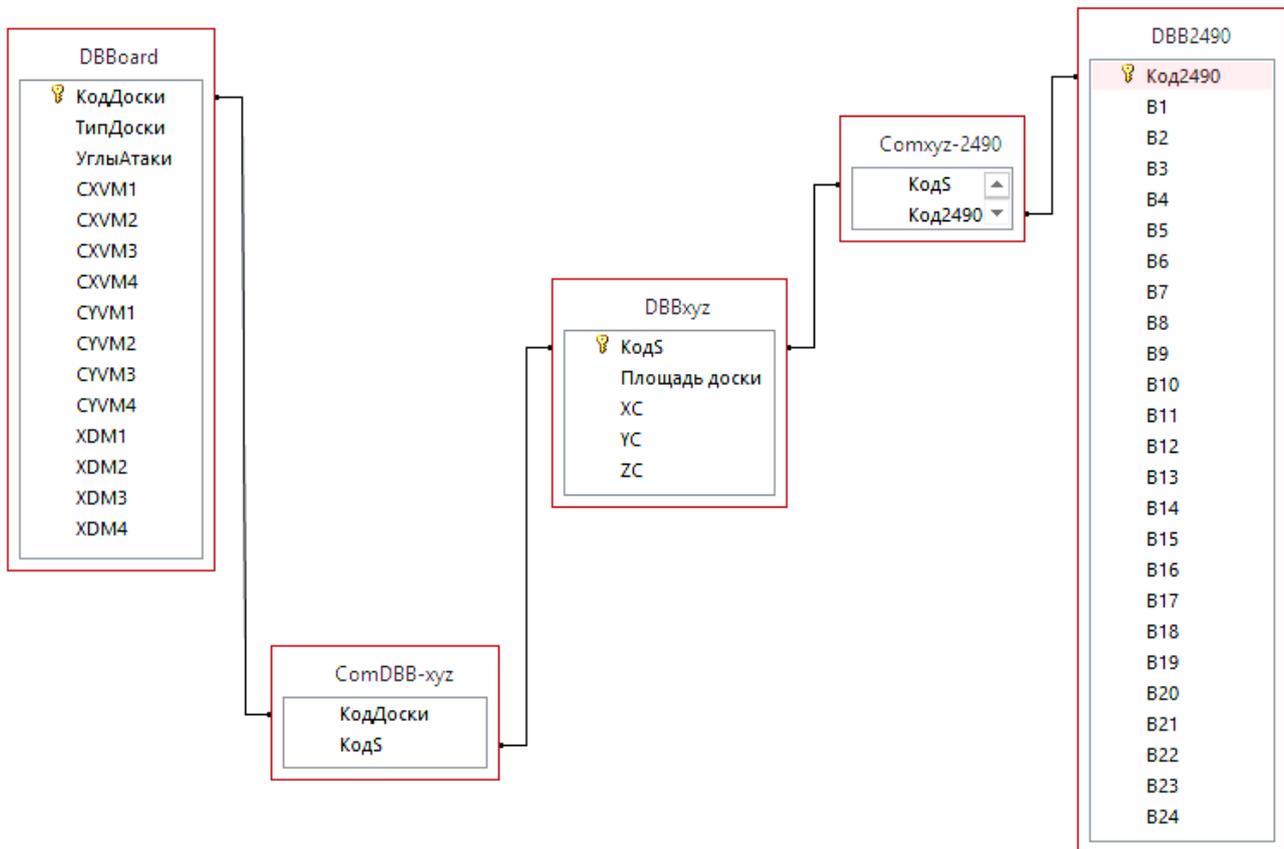


Рис. 1. Схема базы данных «DB-Doors»

Fig. 1. The database schema «DB-Doors»

К основным таблицам относятся таблицы DBBoard, DBBxyz, DBB2490.

Таблица DBBoard содержит названия траловых досок, значения гидродинамических коэффициентов силы сопротивления (CXV\*\*), подъемной силы (CYV\*\*) и относительную абсциссу центра давления (XD\*\*) на углах атаки 15° (\*\*M1), 20° (\*\*M2), 25° (\*\*M3), 30° (\*\*M4), рис. 2.

Таблица DBBxyz содержит координаты центра масс досок для досок различных размеров от площади в плане (рис. 3).

КодДоск	ТипДоски	УглыАтаки	CXVM1	XDM3	XDM4
1	Круглая сферическая	15-30	0,3	0,072	0,08
2	Овал.цил.без крылко	15-25	0,31	0,06	0,06
3	Прям.цил.с крылками		0,28	0,12	0,06
4	ГРУ	15-30	0	-0,53	-0,21

Рис. 2. Таблица DBBoard

Fig. 2. Table DBBoard

КодS	Площадь дс	XC	YC	ZC
1	6	0,015	0,115	0,486
2	4,2	0,06	0,093	0,409
3	4,5	0,06	0,05	0,41
4	5	0,06	0,074	0,43
5	6	0,054	0,056	0,49
6	7	0,056	0,098	0,55
7	8	0,067	0,082	0,586
8	9	0,63	0,118	0,59
9	7,3	0	0,23	0,459

Рис. 3. Таблица DBBxyz

Fig. 3. Table DBBxyz

Таблица DBB2490 (рис. 4) содержит основные характеристики прямоугольных цилиндрических досок конструкции П.П. Аугулиса проекта 2490 с площадями 4,5; 5; 6; 7; 8; 9 м<sup>2</sup>. Описание характеристик представлены в таблице.

Код2490	B1	B2	B3	B4	B21	B22	B23	B24
1	1,5	3	0,12	0,08	0,03	0,1	1,305	1,255
2	1,56	3,2	0,15	0,09	0,05	0,1	1,405	1,355
3	1,74	3,46	0,15	0,1	0	0,12	1,515	1,505
4	1,9	3,7	0,2	0,1	0,05	0,12	1,633	1,725
5	2	4	0,2	0,11	0,03	0,12	1,775	1,785
6	2,14	4,2	0,2	0,12	0,12	1,875	1,885	0

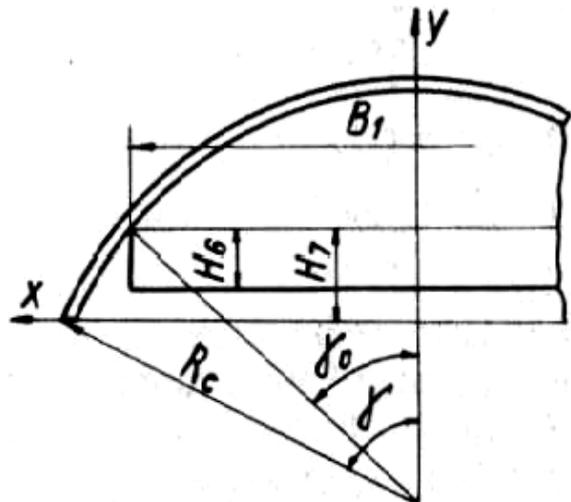
Рис. 4. Таблица DBB2490

Fig. 4. Table DBB2490

### Характеристики досок Characteristics boards

V1	Хорда доски, м
V2	Высота доски, м
V3	Расстояние между двумя соседними отверстиями для крепления лапок к доске, м
V4	Расстояние между двумя соседними отверстиями для крепления дуги к доске, м
V5	Высота траловой дуги, м
V6	Расстояние от центра масс траловой дуги до ее оси вращения, м
V7	Расстояние от точки крепления ваера к планке до ее оси вращения, м
V8	Аппликата центра масс первого стрингера доски (стрингера, на который кладутся килевые пластины)
V9	Радиус сегмента цилиндра доски, м
Параметры килевой пластины, в м	
V10	- хорда
V11	- высота прямоугольника
V12	- расстояние между хордами сегмента круга и сегмента цилиндра Н7 (рис. 5)
V13	Масса одной пластины кия, кг
V14	Масса доски без кия, дуги, цепей, кг
V15	Масса цепей для крепления дуги, кг
V16	Масса траловой дуги с планкой, кг
V17	Угол $\gamma_0$ (рис. 5)
V18, V19	Ордината и аппликата центра масс доски без кия, дуги, цепей
V20, V21	Абсцисса и ордината первого отверстия (считая от оси симметрии доски) для крепления дуги к доске в связанной системе координат (x, y, z)
V22	Аппликата центра давления доски, м
V23	Аппликата первого (считая сверху-вниз) верхнего отверстия для крепления верхней лапки к доске, м
V24	Аппликата первого нижнего отверстия (считая снизу-вверх) для крепления нижней лапки к доске

Рис. 5. Килевая пластина прямоугольной цилиндрической доски проекта 2490  
Fig. 5. Keel plate rectangular cylindrical draft board in 2490



Таблицы, связывающие данные (рис. 6), позволяют совмещать данные основных таблиц в единое целое при помощи связей, как показано на рис. 1, и ключевых (кодовых) полей, таких как КодS (код площади), Код2490 (код доски 2490), КодДоски (код любой доски). Такой подход позволяет объединить данные траловых досок различной формы и размеров в единую базу.

КодS	Код2490
3	1
4	2
5	3
6	4
7	5
8	6

Таблица Comxyz-2490

КодДоски	КодS
1	1
1	2
3	3
3	4
3	5
3	6

Таблица ComDBB-xyz

Рис. 6. Таблицы, связывающие данные  
 Fig. 6. Tables linking data

### Результаты и их обсуждение

В статье представлен вариант базы данных распорных устройств горизонтального раскрытия устья тралов. Представленная база данных может легко дополняться и изменяться по необходимости и использоваться при проектировании и моделировании траловых систем.

### Список литературы

1. Габрюк В.И. Компьютерные технологии в промышленном рыболовстве: моногр. – М.: Колос, 1995. – 544 с.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 448 с.
3. Розенштейн М.М. Компьютерные технологии проектирования траловой системы [Электронный ресурс] // Издательский дом «Морская индустрия». – URL: <http://mi32.narod.ru/03-01/tral.html> (дата обращения: 14.04.2014).

**Сведения об авторах:** Кудакаев Василий Владимирович, кандидат технических наук;  
 Габрюк Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор,  
 e-mail: [gabrukvi@rambler.ru](mailto:gabrukvi@rambler.ru).