

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТЕННЫ ГИДРОЛОКАТОРА ДЛЯ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА

Т.И.НИЗАМОВ

*Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство
AZ1106, Баку, пр. Азадлыг 159*

В работе рассматриваются особенности проектирования и технология изготовления приемо-излучающей пьезокерамической линейной антенны малогабаритного гидролокатора бокового обзора, используемого для подводных съемок рельефа дна, обнаружения объектов на нем и контроля их состояния, в частности, для составления карты расположения подводных нефте- и газотрубопроводов.

Для изоляции пьезокерамических элементов и обеспечения согласования их с водной средой предлагается перспективный звукопрозрачный компаунд. Приводятся сравнительные данные нескольких составов предлагаемого компаунда и его близкого аналога.

Эффективность морского мониторинга оценивается достоверностью априорной информации о поверхности дна, а также о состоянии объектов на нем, обеспечиваемой гидролокатором бокового обзора (ГБО). В зависимости от целевого назначения и круга решаемых задач для выполнения работ в шельфовой зоне к ГБО предъявляются определенные требования, которые включают:

- общие, т.е. присущие всем гидроакустическим средствам, а именно: высокие технико-экономические показатели, взаимозаменяемость и универсальность отдельных узлов, возможность использования в составе с другими подсистемами, мобильность, малые габариты и т.д.;

- частные, относящиеся к конструктивному исполнению и техническим характеристикам, таким как дальность действия, размеры полосы обзора, элементов разрешения на поверхности дна и объектов в водной среде, максимальная производительность, стабильное положение антенны при буксировке и т.д.;

- методы обработки информации, включающие возможность обработки данных в реальном масштабе времени с сохранением как результатов, так и входных данных, а также возможность постобработки в наземных вычислительных центрах с использованием специализированных алгоритмов, применяемых в зависимости от характера поставленной задачи. В частности, программы обработки должны обеспечивать коррекцию геометрических и амплитудных искажений входного сигнала, в том числе учитывать характеристики диаграммы направленности приемо-излучающей антенны, как ее главного, так и боковых лепестков.

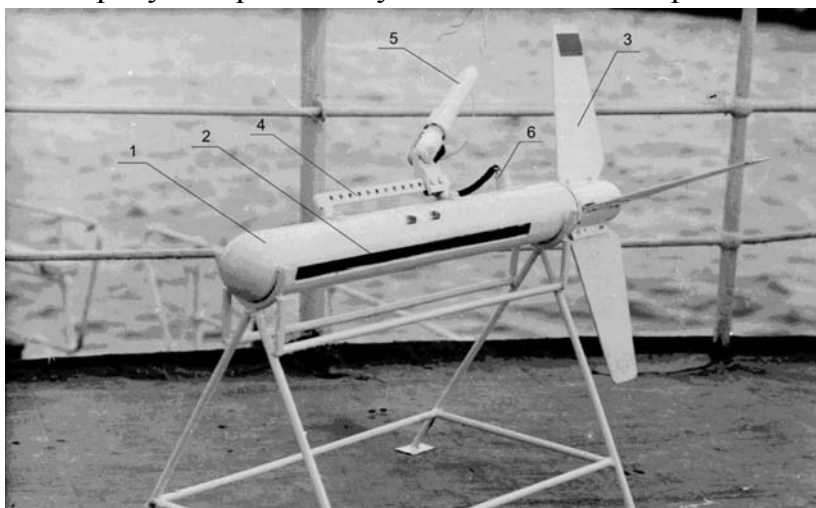
Антенна, особенно в случае активной локации, является важнейшим блоком ГБО, определяющим достоверность получаемой информации, обеспечивая пространственно-избирательное излучение и прием акустической волны.

Целью работы является разработка методики проектирования и технологии изготовления линейной антенной решетки малогабаритного ГБО, который использовался для проведения подводных съемок рельефа дна, обнаружения объектов на нем и контроля их состояния в шельфовой зоне Каспийского моря и на реке Кура [1, 2].

Конструктивное выполнение антенн зависит от выбранного типа электроакустического преобразователя, пьезоматериала, гидроакустического давления, мощности излучения и других факторов [3]. Широкое применение в гидроакустических антеннах нашли пьезокерамические преобразователи, обладающие рядом преимуществ: большой эффективностью, возможностью изготовления активных элементов любой формы и возбуждения различными видами колебаний, широким частотным диапазоном [4]. В настоящее время при

конструировании гидроакустических антенн в основном применяется пьезокерамика на основе титаната-цирконата свинца с различными добавками.

На Рис.1 представлена фотография подводного носителя гидроакустических антенн. В рассматриваемом ГБО применяются две приемо-передающие пьезоэлектрические линейные антенны, размещенные по правому и левому бортам подводного носителя, что обеспечивает обзор полосы поверхности дна моря симметрично относительно направления движения подводного носителя. Тем самым обеспечивается максимальная производительность ГБО при буксировке носителя вслед за судном. Для повышения маневренности при повороте судна также предусмотрено заглубление носителя при помощи выносного устройства с одного из бортов судна. При этом



становится возможным изменять угол наклона оси характеристики направленности антенны относительно вертикали.

Рис.1.

- 1-корпус подводного носителя,
- 2-антенна (одного борта),
- 3-стабилизатор,
- 4-буксировочная скоба,
- 5-кабель-буксир,
- 6-кабель-ввод.

Таким образом, с целью обеспечения простой и приемлемой в эксплуатации конструкции подводного носителя, а также для уменьшения веса кабель-троса и удовлетворения другим, указанным выше, требованиям антенна собирается в виде линейки электрически параллельно соединенных пьезокерамических элементов, размеры которой зависят от необходимой характеристики направленности, определяемой из целевого назначения ГБО, в частности, из разрешающей способности и полосы обзора. На Рис.2 представлен участок дна, попадающий в полосу обзора одного борта ГБО.

Раствор главного лепестка диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости определяется из выражения:

$$\sin \theta_r = \frac{\delta_y}{2R_{\max}}, \quad (1)$$

где δ_y - разрешающая способность в горизонтальной плоскости. R_{\max} - наибольшая наклонная дальность.

Для обеспечения обзора заданной полосы и уменьшения мертвой зоны угол раскрытия главного лепестка диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости определяется из выражения:

$$2\theta_B = \arctg \frac{L_{\text{захв}}}{H} - \arctg \frac{L_{\text{мз}}}{H}, \quad (2)$$

где $L_{\text{захв}}$ - длина участка, попадающего в полосу обзора, H - высота антенны над поверхностью дна, $L_{\text{мз}}$ - длина участка мертвой зоны.

Габаритные размеры антенны (длина и ширина) определяются из углов раствора диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также из рабочей частоты ГБО [5]:

$$L = \frac{0,44\lambda}{\sin \theta_r}, \quad (3)$$

$$W = \frac{0,51\lambda}{\sin \theta_b}, \quad (4)$$

где L - длина, W - ширина антенны; $\lambda = c_B / f$ - длина волны в воде, c_B - скорость звука в воде, f - рабочая частота.

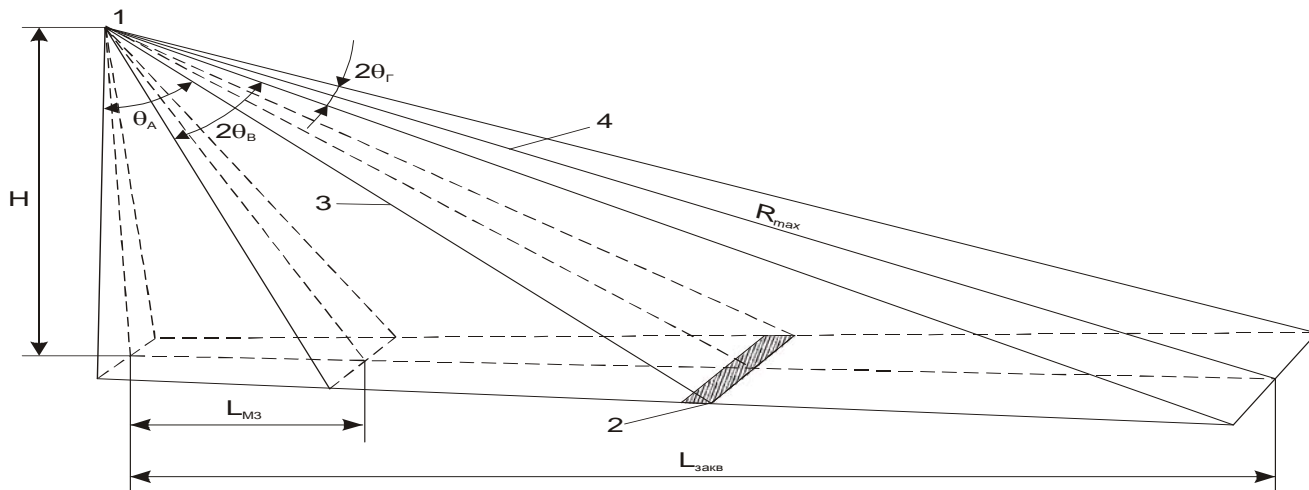


Рис. 2.

1-антенна ГБО, 2-элемент разрешения на дне, 3-ось характеристики направленности антенны в вертикальной плоскости, 4-ось характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости, θ_A -угол наклона оси 3 относительно вертикали, $2\theta_r$ -раствор главного лепестка в горизонтальной плоскости, $2\theta_B$ -раствор главного лепестка в вертикальной плоскости, $L_{закв}$ -длина участка, попадающего в полосу обзора, $L_{мз}$ -длина участка мертвой зоны, H -высота антенны над поверхностью дна, R_{max} -наибольшая наклонная дальность.

В качестве одиночного элемента антенны выбирается дисковый поршень, диаметр которого равен ширине антенны, а высота определяется из условия механического резонанса при продольном пьезоэффекте:

$$\frac{\pi f_p l}{c_3^D} \operatorname{ctg} \frac{\pi f_p l}{c_3^D} = k_{33}^2, \quad (5)$$

где f_p - частота механического резонанса (рабочая частота ГБО), l - высота одиночного элемента антенны, k_{33} - коэффициент электромеханической связи, c_3^D - скорость звука в пьезокерамическом поршне.

Число одиночных элементов в линейке равно:

$$N = \frac{L}{d + d_u}, \quad (6)$$

где d - диаметр одиночного элемента, d_u - интервал между элементами.

Коэффициент электромеханической трансформации:

$$n = d_{33} Y_3^E A / l, \quad (7)$$

где $A = \frac{\pi d^2}{4}$ площадь излучающей поверхности элемента; d_{33} - пьезоэлектрический модуль; Y_3^E - модуль упругости.

Механическая добротность вблизи резонанса:

$$Q = \frac{\pi \rho c_3^D \eta_p}{2 \alpha \rho_B c_B} \quad (8)$$

где ρ_B - плотность воды, ρ - плотность пьезокерамики, η_p - акустико-механический к.п.д., α - коэффициент активного сопротивления излучения.

Полоса пропускания в режиме излучения:

$$2\Delta f_1 = f_p / Q \quad (9)$$

Электрическое напряжение, необходимое для получения заданной акустической мощности P_a при резонансе

$$u = \frac{A}{2n\eta_p} \sqrt{P_a' y_0 \alpha \rho_B c_B} \quad (10)$$

где $P_a' y_0 = \frac{P_a}{NA}$ удельная акустическая мощность.

При этом давление в точке на акустической оси на расстоянии r от излучателя составит:

$$p = \sqrt{\frac{P_a \rho_B c_B K_0}{4\pi r^2}} \quad (11)$$

где $K_0 = 2L/\lambda$ коэффициент осевой концентрации.

Динамическое напряжение, возникающее в пьезокерамике:

$$\sigma = \rho c_3^D \sqrt{\frac{2P_a' y_0}{\alpha \rho_B c_B}} \quad (12)$$

Частота электромеханического резонанса:

$$f_p' = c_3^D / 2l \quad (13)$$

Электромеханическая добротность:

$$Q^D = \frac{Q}{\sqrt{1 - k_{33}^2}} \quad (14)$$

Полоса пропускания в режиме приема:

$$2\Delta f_2 = f_p' / Q^D \quad (15)$$

Чувствительность в режиме приема на частоте резонанса:

$$v_p = \frac{2n\eta_p}{\alpha \rho_B c_B \omega_p C_0} \quad (16)$$

где $C_0 = \varepsilon_{33}^\sigma (1 - k_{33}^2) \frac{A}{l}$ - емкость одиночного элемента, ε_{33}^σ - диэлектрическая проницаемость пьезокерамики.

По формулам (1)-(16) были проведены расчеты параметров антенны ГБО. При расчетах были приняты следующие значения технических характеристик ГБО и физических параметров среды: $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$; $c_B = 1500 \text{ м/с}$; $f_p = 125 \text{ кГц}$; $L = 0,66 \text{ м}$; $W = d = 0,016 \text{ м}$; $l = 0,01 \text{ м}$; $2\theta_\Gamma = 1^\circ$; $2\theta_B = 45^\circ$; $\theta_A = 55^\circ$; $N = 39$; $P_a = 420 \text{ Вт}$, $\alpha = 1$; $d_u = 0,001 \text{ м}$.

Исходя из требований эффективного излучения и приема, выбрана марка пьезокерамики ЦТСНВ-1. При расчетах с учетом параметров выбранной

пьезокерамики были получены следующие значения: $n=0,43\text{Н/В}$; $Q=11,8$; $\Delta f_1=4,7\text{кГц}$; $\eta_p=0,6$; $u=111\text{В}$; $r=10\text{м}$; $p=7\cdot 10^3\text{Па}$; $\sigma=5\cdot 10^6\text{Па}$; $f_p'=184\text{кГц}$; $Q_D=17$; $\Delta f_2=5,5\text{кГц}$; $v_p=1,6\text{мВ/Па}$; $P_{a'уд}=5,4\text{Вт/см}^2$.

Основные ограничения излучаемой мощности преобразователя связаны с явлением кавитации на его рабочей поверхности и возникновением механических напряжений в его активном элементе в динамическом режиме. Порог кавитации характеризуется величиной удельной акустической мощности - интенсивности $I_{\text{доп}}$, при которой кавитация еще не наступает. Порог кавитации тем выше, чем меньше длительность излучаемого импульса, больше гидростатическое давление (заглубление антенны) и выше частота излучения. При длительности импульсов излучения менее 2мс и частоте выше 15кГц $I_{\text{доп}} \geq 20\text{Вт/см}^2$, следовательно, с точки зрения кавитации такая удельная мощность ($5,4\text{Вт/см}^2$) вполне допустима. Поскольку расчетное значение динамического напряжения более чем в 3 раза меньше допустимого, то и с этой точки зрения рассчитанное значение удельной мощности является допустимым.

Диаграммой направленности антенны называется зависимость величины звукового давления, создаваемого излучателем, или электрического сигнала приемника, от направления на точку наблюдения. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости одиночного элемента антенны в форме дискового поршня определяется в виде цилиндрической функции Бесселя:

$$R_B(\theta) = R(\theta) = \frac{2J_1\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta}. \quad (17)$$

Соответственно диаграмма направленности в горизонтальной плоскости определяется согласно теореме умножения как

$$R_r(\theta) = R(\theta)F(\theta), \quad (18)$$

где $F(\theta)$ - диаграмма направленности дискретной линейной базы из N одинаковых и равноотстоящих синфазно колеблющихся точечных элементов, имеющих каждый диаграмму направленности дискового поршня:

$$F(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N\pi(d+d_u)}{\lambda} \sin \theta\right]}{N \sin\left[\frac{\pi(d+d_u)}{\lambda} \sin \theta\right]}. \quad (19)$$

Угол раствора главного лепестка на уровне 0,707 (-3dB) определяется из условия $R_B(\theta)=0,707$, т.е. $\varphi=1,6$, где $\varphi = (\pi d/\lambda) \sin \theta$, а на уровне 0 из условия $\varphi=3,83$, т.е. $\sin \theta_{0,7} = 0,51\lambda/d$, $\sin \theta_0 = 1,22\lambda/d$.

Кроме основного лепестка, диаграмма направленности содержит один или больше (в зависимости от соотношения d/λ) боковых лепестков, максимумы которых меньше максимума основного лепестка и расположены под различными углами к акустической оси. Чем меньше число и ниже уровни боковых максимумов, тем больше величина излучаемой звуковой энергии в требуемом направлении, тем выше отношение сигнал/шум и ниже вероятность ложного пеленга в режиме приема. Диаграмма направленности рассматриваемой антенны в вертикальной плоскости содержит один боковой максимум. Его направление определяется из условия $\varphi=5,14$, а величина составляет 0,13 от главного максимума.

Значения углов раскрыва, величин и направлений главного и бокового лепестков сведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметр		Вертикальная ДН	
Главный лепесток	Направление	0°	0°
	Величина	1	1
	Угол раскрыва на уровне 0,7	45°	1°
Боковые максимумы	1	Величина	0,07
		Направление	90°
	2	Величина	-
		Направление	-
	3	Величина	-
		Направление	-

Конструкция антенны приведена на Рис. 3. На основании размещается экран из пенопласта для предотвращения тыльного излучения. На экран крепится ряд из 39 пьезокерамических элементов, изготовленных из сплава ЦТСНВ-1. Каждый элемент представляет собой сплошной цилиндр диаметром 16 мм и высотой 10 мм.

Все элементы соединены параллельно, при такой схеме соединения используется продольный пьезоэффект. Линейка с установленными пьезоэлементами заливается составом, представляющим собой полимерполиэфируретановый компаунд и предназначенным для электроизоляции и герметизации пьезокерамики в морской воде. Кроме этого, компаунд также должен обеспечить наиболее эффективное согласование параметров пьезоэлементов и водной среды, т.е. быть звукопрозрачным, обладать наряду с высокими физико-механическими показателями улучшенными свойствами для герметизации и электроизоляции пьезокерамических блоков, работающих в морской воде, в частности, лучшими адгезионными свойствами с керамикой и металлами, высокой гидролитической устойчивостью и долговечностью, а также иметь простую технологию получения для снижения себестоимости.

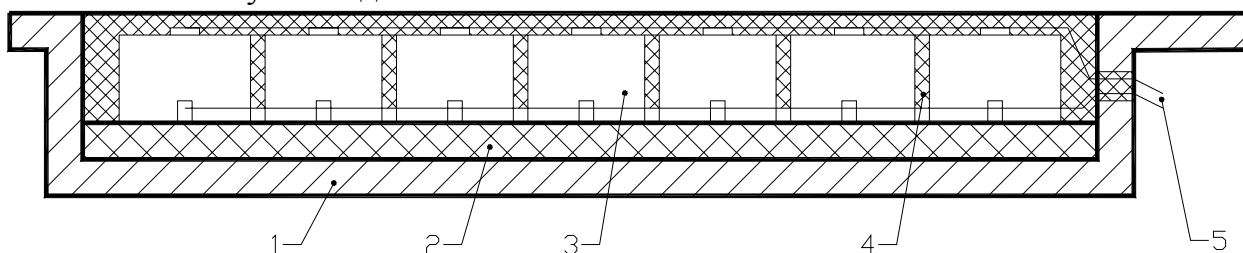


Рис.3.

1-основание антенны, 2-экран, 3-пьезоэлемент, 4-заливочный компаунд, 5-кабель-ввод

Анализ известных компаундов [6] показал, что они легко гидролизуются в морских условиях, характеризуются многокомпонентностью, и каждый из компонентов имеет сложную технологию получения, конечные материалы обладают повышенной диэлектрической проницаемостью, узким интервалом рабочих температур, низким удельным сопротивлением, и, кроме того, процессы приготовления являются многостадийными и сложными, в их состав входят непердельные звенья, которые склонны к окислительному разрушению, что в конечном счете приводит к снижению долговечности конечных продуктов. При изготовлении экспериментального образца рассматриваемой антенны был применен

разработанный нами оригинальный состав заливочного компаунда, на который было получено положительное решение о выдаче патента [7]. Разработанный компаунд имеет пониженную диэлектрическую проницаемость, повышенное удельное сопротивление, расширенный интервал рабочих температур, что приводит к лучшему согласованию пьезокерамических стержней с водой, повышенной антикоррозионной стойкости, обеспечивает повышенную изоляцию и герметизацию антенны. Следует отметить, что применяемые при изготовлении компаунда материалы легкодоступны и экономичны. Технология получения компаунда достаточно проста, что иллюстрируется следующими примерами.

Пример 1. К 100 массовым частям (м.ч.) сложно-простого бис-монодифенолпропанового полиэфира себаценовой кислоты с молекулярной массой 1002 с концевыми гидроксильными группами добавляют 100м.ч. инертного растворителя (толуола или ксилола или смеси растворителей марки Р-4), при комнатной температуре перемешивают до получения однородного раствора. В него вводят 50м.ч. отвердителя полиизоцианата «К», перемешивают. Таким образом приготовленную композицию заливают в специально приготовленную форму. Через 10-12 часов определяют физико-механические показатели полученных материалов.

Пример 2. В соответствии с методикой примера 1 готовят полиэфируретан с применением 100 м.ч. сложно-простого полиэфира с молекулярной массой 100 м.ч. растворителя и 60 м.ч. отвердителя - полиизоцианата «К».

Пример 3. Процесс, описанный в примере 1, повторяют с применением 100м.ч. жирноароматического бис-монодифенол-пропанового эфира себаценовой кислоты, 100м.ч. растворителя и 70м.ч. отвердителя-полиизоцианата «К».

Пример 4. Из 100м.ч. сложно-простого полиэфира себаценовой кислоты, получаемого на основе бис-монодифенилпропанового эфира дипропиленгликоля и себаценовой кислоты с молекулярной массой в примере 1, 100 м.ч. растворителя и 80 м.ч. того же полиизоцианата «К» получают компаунд.

Таблица 2.

Параметры	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	ПУ-3К
Плотность, г/см ³	0,78	0,83	0,85	0,95	0,956
Скорость звука, м/с	1700	1800	1950	2000	-
Коэффициент линейного расширения, $\times 10^6$, 1/К	140	90	80	70	100-120
Объемная усадка при отверждении, %	0,5	0,6	0,75	0,82	0,74
Механическая прочность на разрыв, Мпа	2	5	6	8	3-4
Прочность связи на отслаивание, кг/см ²					
- с пьезокерамикой	3	6	7	8	4
- с титаном	8	12	14	17	10
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	10^{14} - 10^{15}	10^{15} - 10^{16}	10^{16} - 10^{17}	10^{18} - 10^{20}	10^{12} - 10^{13}
Коэффициент влаго-непроницаемости, г/мм, Па,ч	$3 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{10}$	10^{10}	10^{10}	$2,9 \cdot 10^{11}$
Интервал рабочих температур, °С	-50-+150	-50-+150	-50-+150	-50-+150	-50-+150
Диэлектрическая проницаемость	2,0-2,5	1,5-2,0	1,0-1,5	1,0-1,5	2,9-3,2
Электрическая прочность в однородном поле на частоте 50Гц, кВ/мм	25-30	30-35	35-40	40-50	20-25

Физико-механические свойства четырех составов рассматриваемого компаунда, а также полиуретанового компаунда, наиболее близкого к рассматриваемому в [6], сведены в Таблице 2.

Сопоставительный анализ этих данных показывает, что полиэфируретан, полученный в примере 2, наиболее удовлетворяет требованиям, предъявляемым к заливающим компаундам для герметизации и электроизоляции пьезокерамических блоков, работающих в морской воде, что подтверждается использованием указанного состава в антенне гидроакустической системы.

Следовательно, применение в гидроакустических антеннах разработанного заливающего компаунда благодаря его физико-механическим свойствам, доступности изготовления, технологичности заливки и универсальности использования вызывает более эффективное использование гидроакустических средств при решении различных исследовательских морских задач.

Полученные изображения морского дна и объектов позволяют проводить последующую обработку, во время которой необходимо предусмотреть использование программ коррекции искажений вследствие неравномерности диаграммы направленности антенны, особенно ее боковых лепестков.

1. Т.И.Низамов, *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, Баку, №5 (2003).
2. A.Sh.Mekhtiev, T.I.Nizamov, *Turkish Journal of PHYSICS*, **20** № 8 (1996) 823.
3. Л.В.Орлов, А.Л.Шабров, *Пищевая промышленность*, М., (1974) 242.
4. Г.М.Свердлин, *Прикладная гидроакустика*, Л., Судостроение, (1976).
5. Г.М.Свердлин, *Гидроакустические преобразователи и антенны*, Л., Судостроение, (1980) 18.
6. *Подводные электроакустические преобразователи. Справочник*. Под ред. В.В.Богородского, Л., Судостроение, (1983).
7. Р.С.Алиев, Т.И.Низамов, З.А.Мухтаров и др., *Заливочный компаунд. Положительное решение патентной экспертизы ВНИИГПЭ СССР по заявке № 4925319/05 (009911) от 31.01.91.*

DƏNİZİN MONİTORİNGİ ÜÇÜN HİDROLOKATORUN ANTENNASININ LAYİHƏLƏNDİRİLMƏSİNİN XÜSUSİYYƏTİ

T.İ.NİZAMOV

Məqələdə dənizin relyefini oradakı obyektlərin yerləşməsinə öyrənmək onların vəziyyətinə nəzarət etmək məqsədilə istifadə olunan kiçik ölçülü "Yandan baxış" hidrolokatorunun pyezokeramik yığılmış qəbuledici-ötürücü elementlərindən antenasının layihələndirilməsinin texnologiyasının və antenmanı su mühitindən təcrid edən yeni hazırladığımız kimyəvi kompaundun tətbiqindən bəhs olunur.

Yeni tipli kompaundun mövcud materiallardan texniki xarakteristikalarına görə üstünlüyü və bilavasitə lokatorun işləyən maketində istifadə olunması göstərilmişdir.

PARTICULARITIES OF DESIGNING THE SONAR ANTENNA FOR SEA MONITORING

T.I.NIZAMOV

Particularity of designing and producing the receiving-and-emitting piezoceramic linear antenna of compact sonar using for bottom relief underwater survey, finding out objects on it and control of their conditions, in particular for designing of a map of underwater oil and gas pipeline location were considered, Perspective sound-conducting compound was proposed for insulation of piezoceramic components and providing of their synchronization with water environment. Comparative data of various compositions of the proposed compound and its close analogue were given.

Редактор: Г.Аждаров

