

Автономный необитаемый подводный аппарат для поиска, обнаружения и уничтожения миноподобных объектов

А. В. Вагин[✉], А. С. Воротынцева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ av.vagin@bk.ru

Аннотация. Исследованы принципы функционирования автономного необитаемого подводного аппарата, решающего задачи поиска, обнаружения и уничтожения миноподобных объектов. Рассмотрены основные принципы построения и функционирования противоминного АНПА, приведены гидроакустические средства поиска миноподобных объектов с указанием оптимального алгоритма обнаружения и классификации, описана система уничтожения. Приведены основы оптимального конструктивного исполнения противоминных АНПА в части построения общей структуры аппарата и рекомендаций применения материалов изготовления.

Ключевые слова: подводный аппарат, поиск объекта, обнаружение объекта, уничтожение объекта

Для цитирования: Вагин А. В., Воротынцева А. С. Автономный необитаемый подводный аппарат для поиска, обнаружения и уничтожения миноподобных объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 4. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-5-15.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Autonomous Uninhabited Underwater Vehicle for Searching, Detecting and Destroying Mines

A. V. Vagin[✉], A. S. Vorotyntseva

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ av.vagin@bk.ru

Abstract. The paper studies the principles of functioning of an autonomous uninhabited underwater vehicle that solves the problems of searching, detecting and destroying mines. The basic principles of the construction and operation of the anti-mine AUV are considered, hydroacoustic means of searching for mines with a description of the optimal detection and classification algorithm are given, and the system for destroying mines is described. The basics of the optimal design of anti-mine AUVs in terms of the design of the general structure of the vehicle and recommendations for the use of manufacturing materials are given.

Keywords: underwater vehicle, object search, object detection, object destruction

For citation: Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Autonomous Uninhabited Underwater Vehicle for Searching, Detecting and Destroying Mines // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 4. P. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-5-15.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Использование и совершенствование современного минного оружия в настоящее время предписывают создание оптимальных средств противоминной обороны (ПМО), обеспечивающих безошибочный эффективный поиск мин и их последующее обезвреживание, либо уничтожение. Проблема ПМО, как показано в [1], актуальна еще со времен Первой и Второй мировых войн, когда было показано результативное действие минного оружия, применяемого против подводных лодок и надводных кораблей. Уже тогда стало ясно, что необходимо создавать отдельные специализированные средства, с помощью которых можно было бы проводить эффективный поиск морских мин для обеспечения безопасного маневрирования корабля и, в случае необходимости, обхода или пробития морского минного заграждения (ММЗ). В настоящее время эта проблема сохраняет свою актуальность, поскольку, как показано в [2], [3], при ведении войны на море мины все еще остаются эффективным оружием, влияющим на ход боевых действий, что подтверждают вооруженные конфликты в Персидском заливе (1990–1991 гг.), боевые действия НАТО против Югославии (1999 г.) и, помимо прочего, известны случаи терроризма при помощи постановки мин – к примеру, в Суэцком канале и Красном море в 1984 г. и у побережья Шри-Ланки в 2008 г. [4].

В связи с этим встает важный вопрос о создании оптимального средства для борьбы с минной угрозой – среди уже существующих можно выделить несколько систем для решения задач противоминной обороны. Достаточно распространена система противоминного корабля (тральщика) и гидроакустической станции миноискания (ГАСМ). В такой системе мины обнаруживаются и идентифицируются посредством применения ГАСМ, установленной на противоминном корабле, в задачи которой входит именно поиск и определение координат мин. Информация об объекте, полученная от ГАСМ, используется для дальнейших действий по обезвреживанию мин средствами противоминного корабля, который уничтожает их тралением, т. е. нейтрализацией контактными и неконтактными тралями-имитаторами физических полей корабля (ФПК). Данная система неоптимальна, поскольку не обеспечивает достаточной производительности при обследовании района и требует уточнения результатов поиска. Помимо прочего, такая система не гарантирует условий безопасности для экипажа противомин-

ного корабля [5]. Системы искателей-обнаружителей донных мин, построенных на различных физических принципах – электрических, оптических и электромагнитных, – как показано в [6], также не могут быть оптимальными, поскольку не обеспечивают безопасность маневрирования корабля (эти устройства буксируются на кабеле от корабля обеспечения) и поскольку результат обнаружения данными средствами представляется лишь миноподобным объектом, что предписывает дальнейшие операции допоиска для последующего уничтожения мины.

Задача поиска и обнаружения мин – комплексная и требует решения с помощью не одного средства, а целого робототехнического комплекса для ПМО – для эффективного разминирования необходимо разработать некоторый комплекс систем, обеспечивающих высокопроизводительный поиск и классификацию объектов, а также выполняющих обезвреживание мин – такая задача может быть реализована системой корабля-носителя с автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА). Такая система не требует допоиска при обнаружении мин, обладает более точными данными при классификации обнаруженных объектов, а также решает вопрос не только поиска, но и уничтожения мин, при этом обеспечивая безопасность экипажа противоминных кораблей (кораблей-носителей АНПА). Также большое преимущество АНПА заключается в возможности работы на любых глубинах, так как связь обеспечивается по гидроакустическому каналу без применения кабельных тросов. Кроме того, задачи ПМО в настоящее время решаются такими аппаратами и без сопровождения корабля-носителя посредством полной программной реализации алгоритмов работы АНПА [7], [8].

Из вышеперечисленных систем ПМО перспективным направлением развития и наиболее предпочтительным вариантом является использование системы корабля-носителя с АНПА – как показано в [9], [10], такие специализированные комплексные системы оптимальны и наиболее эффективны для противоминных действий и доминируют в составе противоминных сил ведущих зарубежных государств. По данным открытой печати [11] НПА были успешно применены в ходе военно-морских учений НАТО «Посейдон-21» для обеспечения противоминных операций.

Таким образом, поставлена задача рассмотрения перспективных идей построения и конструктивных решений АНПА, обеспечивающего поиск и уничтожение мин, который, в свою очередь, и служит объектом исследования данной статьи.

Основные принципы построения и функционирования противоминного АНПА. В первую очередь необходимо установить цели, возлагаемые на автономные необитаемые подводные противоминные аппараты – такие устройства должны обеспечивать решение трех задач: поиска, классификации и уничтожения мин. Решение первой задачи обеспечивается посредством обнаружения отраженного объектом сигнала, второй – установлением формы и габаритов объекта в целях классификации его как миноподобного объекта или мины с последующим определением координат. Уничтожение мин обеспечивается аппаратом за счет комплекса специализированных средств – отдельной боевой части.

Решение задач миноискания предписывает ряд определенных условий, в которых должен действовать противоминный АНПА. Так, существующие в настоящее время виды минного оружия охватывают некоторый диапазон глубин – как правило, не превышающий 200 м [12], – таким образом, согласно классификации подводных аппаратов по глубине погружения, приведенной в [13], противоминные АНПА относятся к аппаратам для малых глубин – до 600 м. Поскольку на вооружении мировых флотов в противоминные средства входят так называемые донные и придонные мины, задача противоминного АНПА осложняется влиянием донной реверберации, что усложняет поиск и классификацию объекта, что может быть решено понижением длительности зондирующих импульсов при повышении мощности излучения. Также преодолеть эффект донной реверберации можно улучшением направленных свойств характеристик антенны поискового средства, что в свою очередь, обеспечивается применением гидроакустических средств с синтезированной апертурой антенны [1].

Помимо прочего необходимо отметить, что работа противоминного АНПА требует высокой маневренности аппарата при низких значениях скорости движения, а также выполнения важного условия по вероятностям обнаружения – при поиске мин необходимо обеспечить высокое значение вероятности правильного обнаружения одновременно с крайне низким параметром вероятности ложной тревоги.

По вопросу построения АНПА выделяются два принципиально отличающихся способа. Первый способ представляет собой размещение всех необходимых механизмов и устройств в одном или двух прочных корпусах с разделением информационно-измерительной системы и системы управления в одном корпусе, и энергетической установки (аккумуляторов и силовых цепей) – во втором. Другой способ построения – это модульная система, которая предполагает разбиение аппарата на отсеки (блоки) с определенной иерархической структурой. Такой способ построения оптимален при проектировке противоминных АНПА, поскольку модульная конструкция предоставляет возможность удобной и быстрой сборки аппаратов, внесения необходимых изменений в состав отсеков полезной нагрузки, а также несложное изготовление прочных контейнеров. Кроме того, поскольку рассматриваемые АНПА имеют специализированную сферу применения – работы военного назначения по поиску и уничтожению мин, – к достоинству данного способа построения можно отнести также возможность скрытного доставления аппарата к месту назначения [14], [15].

Таким образом, для оптимального и действенного выполнения поставленных задач необходим некоторый соответственно размещенный комплекс систем, входящих в рассматриваемое устройство. Как показано в [16], принято выделять некоторый основной состав функциональных блоков, отвечающих за работу определенной части аппарата:

1. Система управления – обеспечивает управление работой АНПА, содержит программный комплекс управления, контрольно-аварийную систему, различные датчики, передающие информацию о состоянии устройства.

2. Система энергообеспечения – содержит энергетическую установку (ЭУ) аппарата, силовые цепи и вспомогательные механизмы.

3. Двигательно-рулевой комплекс – отвечает за обеспечение движения АНПА, работу двигателей, содержит гребные винты, вертикальные и горизонтальные рули.

4. Комплекс гидроакустических средств навигации и связи – обеспечивает связь с кораблем-носителем АНПА.

5. Бортовой автономный навигационный комплекс – содержит измеритель скорости (доплеровский лаг), эхолот, систему обнаружения навигационных препятствий, инерциальную навигационную систему, аппаратуру спутниковой навигации.

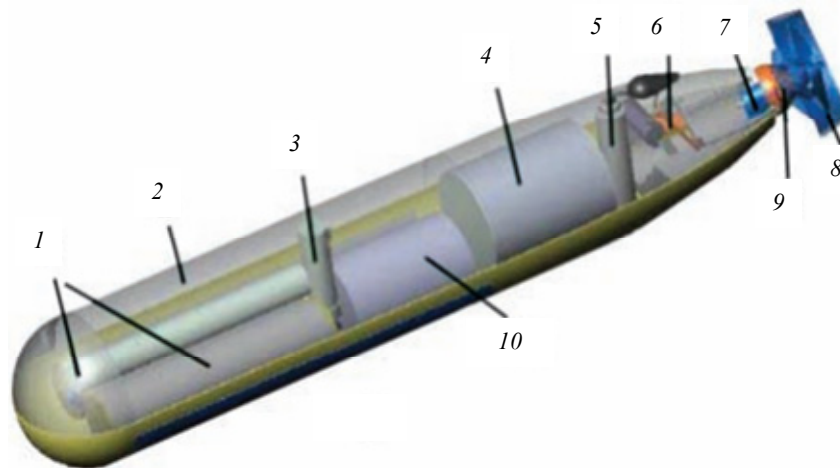


Рис. 1. Устройство АНПА «BPAUV»
Fig. 1. Composition of the BPAUV

6. Система поиска – обеспечивает эффективное обнаружение и идентификацию мин при помощи комплекса применяемых устройств; в основе лежит комплекс гидроакустических средств – обзорных гидролокаторов и эхолота, информация о которых подробно излагается далее. Также для уверенного и точного обеспечения классификации обнаруженных объектов в данной системе необходимо использовать и оптоэлектронную аппаратуру – телевизионные камеры с подсветкой, осуществляющие телетрансляцию мины – такой комплекс поисковых систем обеспечит высокопроизводительный поиск мин.

7. Система, обеспечивающая уничтожение мин, – предусматривает нейтрализацию обнаруженных мин размещением в устройстве специального отделения с зарядом взрывчатого вещества или же снабжением АНПА определенными специализированными средствами, о которых будет сказано далее.

Важно отметить, что при проектировании аппарата необходимо также учитывать определенное размещение и компоновку систем в соответствии с их назначением – пример размещения некоторых систем и механизмов показан на рис. 1 [17].

На рисунке представлен АНПА американской робототехнической компании «Bluefin Robotics», название которого переводится как «НПА для подготовки боевого пространства», который содержит в своем устройстве следующие компоненты: 1, 10 – прочные контейнеры радиоэлектронной аппаратуры; 2 – легкий корпус аппарата; 3 – стакан стропального устройства; 4 – прочный контейнер ЭУ; 5 – подъемная мачта антенны GPS; 6 – рулевой электропривод; 7 – электродвигатель; 8 – гребной винт; 9 – шарнир.

Система гидроакустических средств поиска мин. Как было отмечено, один из основных блоков устройства противоминных АНПА – это комплекс гидроакустических средств, решающий задачу поиска мин. В силу специфики поставленной задачи, для ее успешного выполнения необходимо предусмотреть несколько гидроакустических средств, совместное использование которых позволит решать задачу поиска с достаточной точностью и высокой производительностью. В зависимости от сектора поиска, предусмотрено снабжение АНПА следующими средствами (рис. 2) [18]:

- гидролокатор бокового обзора (ГБО) – осуществляет поиск донных и придонных мин в широкой полосе обзора посредством использования двух бортовых антенн с широкой характеристикой направленности антенны в вертикальной плоскости (около 60°), ориентированной перпендикулярно линии курса носителя;
- многолучевой эхолот (МЛЭ) – обеспечивает поиск мин на дне и в толще воды (якорные мины)

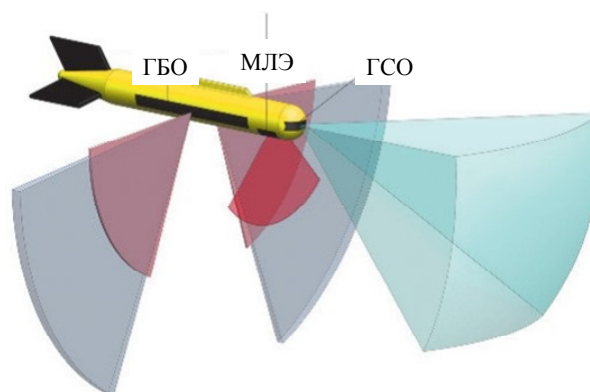


Рис. 2. Гидроакустические средства противоминного АНПА
Fig. 2. Hydroacoustic means of anti-mine AUV

посредством батиметрической съемки с помощью формирования веера узких акустических лучей в плоскости, перпендикулярной направлению движения; использование МЛЭ также позволяет перекрывать «мертвую зону» ГБО при движении носителя;

– гидролокатор секторного обзора (ГСО) – предназначен для поиска мин впереди по курсу АНПА, обзор пространства в данном случае осуществляется вращением характеристики направленности антенны в некотором заданном секторе [19].

Необходимо отметить, что перспективно применение гидролокаторов с синтезированной апертурой антенны – т. е. апертурой, которая представляет собой результат последовательного во времени приема сигнала реальной апертурой при различном ее положении относительно источника сигнала. Вследствие этого длина синтезированной антенны становится существенно больше размеров физической антенны, установленной на устройстве, что позволяет реализовать высокое разрешение в генерации низкочастотного разностного акустического сигнала с узкой диаграммой направленности, формируемого наложением двух высокочастотных сигналов с незначительно различающимися значениями несущей частоты. Использование таких средств за счет значительного повышения разрешающей способности гидролокатора позволит существенно повысить точность и производительность операции поиска, а также обнаруживать мины, не только находящиеся в толще воды и на поверхности дна, но и погруженные в грунт [20].

Сам поиск мин состоит из двух этапов: непосредственно обнаружения миноподобного объекта и его дальнейшей классификации. В настоящее время благодаря развитию цифровой техники поиск выполняется с помощью цифровых вычислительных комплексов гидроакустических средств – как показано в [1], выработан алгоритм (рис. 3), реализующий автоматическое обнаружение и классификацию мин с помощью анализа светотеневых фрагментов изображения.

На входе алгоритма имеется массив сигнальной информации в цифровой форме a , подаваемый на вход трех блоков обработки: I – сегментация акустического изображения, полученного с помощью гидролокатора; II – определение признаков; III – классификация объекта. В первом блоке осуществляются следующие операции: предварительная обработка данных – нелинейная фильтрация 1, формирование сегментов изображения 2, перекрывающихся между собой, построение гистограмм 3 и определение пороговых уровней светотеневых фрагментов 4. Во втором блоке выполняется образование фрагментов с наибольшим отношением «свет–тень» 5, затем непосредственно – выработка показательных признаков 6 и последующее выделение светотеневых областей 7. В третьем блоке проводится оценка этих фрагментов 8 и дальнейшее определение областей, содержащих миноподобные объекты 9 и их соответствующая классификация 10. В результате работы алгоритма на выходе системы имеется информация о частях пространства, в которых присутствуют миноподобные объекты b .

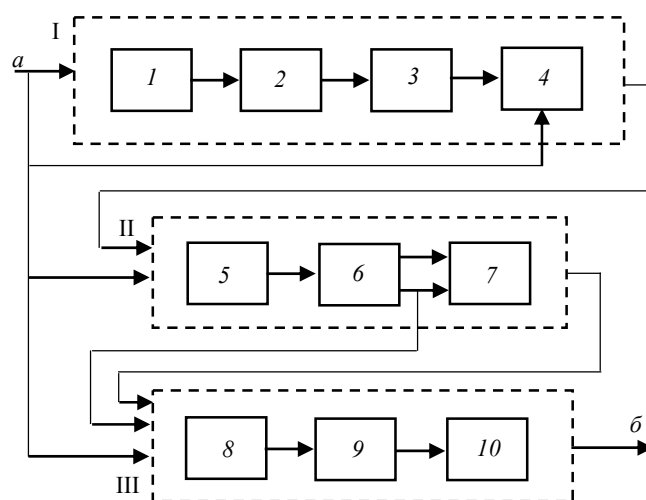


Рис. 3. Структура алгоритма обнаружения и классификации мин

Fig. 3. Structure of the mine detection and classification algorithm

Как было отмечено ранее, при поиске минимального значения придается условию вероятностей обнаружения – необходимо обеспечить высокое значение вероятности правильного обнаружения одновременно с крайне низким параметром вероятности ложной тревоги. Исходя из задач обнаружения, необходимо выбрать оптимальный критерий, соответствующий заданным условиям, – в данном случае оптимальным критерием Неймана–Пирсона, согласно которому обеспечивается максимальная вероятность правильного обнаружения при заданной низкой вероятности ложной тревоги, причем знания априорной информации о наличии или отсутствии цели не требуется. Таким образом, необходимо рассмотреть алгоритм обнаружения сигнала со случайной начальной фазой при работе по критерию Неймана–Пирсона.

Полезный сигнал $s(t)$ задается выражением

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \beta],$$

где $A(t)$ – детерминированная амплитуда сигнала; ω_0 – частота сигнала; $\varphi(t)$ – детерминированная составляющая фазы сигнала; β – случайная составляющая фазы сигнала.

Первый шаг алгоритма обнаружения состоит в вычислении корреляционного интеграла, выражение для которого имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} z &= \int_0^T A(t)x(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \beta] dt = \\ &= \cos \beta \int_0^T A(t)x(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] dt - \\ &- \sin \beta \int_0^T A(t)x(t) \sin[\omega_0 t + \varphi(t)] dt. \end{aligned}$$

Обозначив

$$\begin{aligned} \int_0^T A(t)x(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] dt &= z_1; \\ \int_0^T A(t)x(t) \sin[\omega_0 t + \varphi(t)] dt &= z_2, \end{aligned}$$

можно определить огибающую Z и фазу корреляционного интеграла θ по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{z_1^2 + z_2^2}; \\ \theta &= \arctg \frac{z_2}{z_1}. \end{aligned}$$

Тогда выражение для корреляционного интеграла примет вид

$$z = Z (\cos \beta \cos \theta - \sin \beta \sin \theta) = Z \cos(\beta + \theta),$$

$$\text{где } \cos \theta = \frac{z_1}{Z}; \sin \theta = \frac{z_2}{Z}.$$

Далее необходимо определить отношение правдоподобия:

$$l = \exp\left(-\frac{E_s}{N_0}\right) \exp\left[2 \times \frac{Z \cos(\beta + \theta)}{N_0}\right],$$

где E_s – энергия сигнала; T_0 – спектральная плотность мощности шума.

Поскольку отношение правдоподобия для сигнала со случайной начальной фазой – это функция случайной составляющей фазы сигнала β , его необходимо усреднить по β :

$$\begin{aligned} \bar{l} &= \exp\left(-\frac{E_s}{N_0}\right) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[2 \times \frac{Z \cos(\beta + \theta)}{N_0}\right] d\beta = \\ &= \exp\left(-\frac{E_s}{N_0}\right) I_0\left(\frac{2Z}{N_0}\right), \end{aligned}$$

где I_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

В соответствии с теорией и вышеприведенным изложением, оптимальным алгоритмом обнаружения является вычисление значения Z и сравнение его с некоторым пороговым значением Z_0 – при превышении порога принимается решение о наличии сигнала, при значении сигнала ниже порогового уровня – о его отсутствии. Поскольку критерием оптимальности в случае обнаружения мин выбран критерий Неймана–Пирсона, порог определяется следующим выражением:

$$Z_0 = \sigma_z \sqrt{-2 \ln(P_F)},$$

где $\sigma_z = \sqrt{\frac{N_0 E_s}{2}}$; $P_F = \exp\left(-\frac{Z_0^2}{2\sigma_z^2}\right)$ – условная вероятность ложной тревоги.

Условная вероятность правильного обнаружения определяется по формуле

$$P_D = \int_{u_0}^{+\infty} v \exp\left(-\frac{v^2 + q^2}{2}\right) I_0(vq) dv,$$

где $q = \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}$; $v = \frac{Z}{\sigma_z}$; $u_0 = \frac{Z_0}{\sigma_z}$.

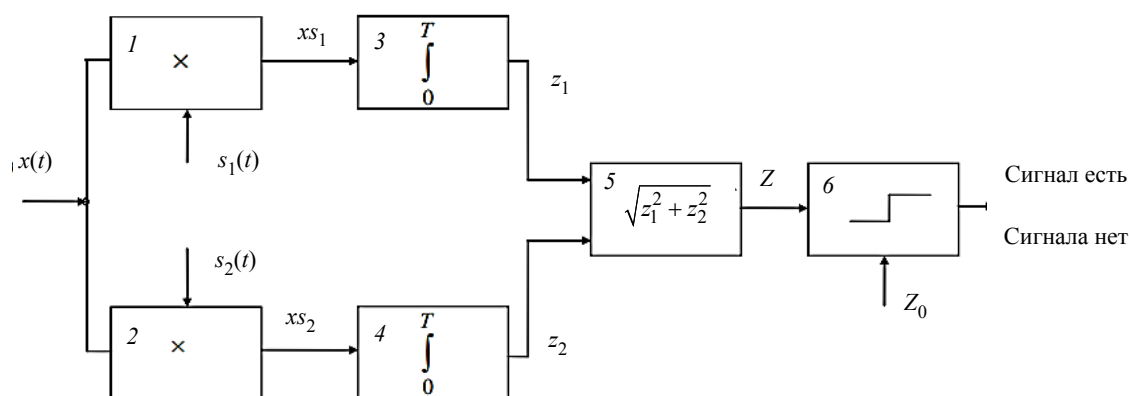


Рис. 4. Структура обнаружителя

Fig. 4. Structure of the detector

На рис. 4 приведена структурная схема оптимального обнаружителя, на вход которого подается сигнал $x(t)$, поступающий на следующие блоки: 1 и 2 – перемножители на опорные сигналы $s_1(t) = a \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$ и $s_2(t) = a \sin[\omega_0 t + \varphi(t)]$, где a – амплитуда опорных сигналов; 3 и 4 – интеграторы; 5 – блок вычисления огибающей Z ; 6 – пороговое устройство. На выходе обнаружителя – решение о наличии сигнала [21].

Система уничтожения мин. Ранее отмечалось, что для обезвреживания или уничтожения мин в устройстве аппарата предусмотрены определенные специализированные средства, способствующие выведению мины из строя. Минные комплексы могут быть нейтрализованы двумя основными способами: контактным, т. е. непосредственным подрывом мины, и неконтактным – принудительным срабатыванием взрывателя мины.

В первую очередь необходимо отметить, что по способу действия взрывателя морские мины в основном подразделяются на гальваноударные, антенные, магнитные, акустические и т. д. [1]. В случае контактного уничтожения мин в устройстве АНПА предусматривается размещение специального отделения с зарядом взрывчатого вещества – кумулятивный или фугасный заряд, который сбрасывается на мину для дальнейшего ее подрыва. Также для непосредственного уничтожения минного комплекса аппарат может снабжаться отделяемыми одноразовыми самоходными НПА, представляющими собой «миниторпеды». Такой способ уничтожения близок к оптимальному, поскольку может применяться к любому типу мины, вне зависимости от ее принципа действия.

Если не взрывать мину непосредственно, то можно вызвать ее срабатывание при помощи воздействия специализированных средств, генери-

рующих определенные физические поля корабля, что также обеспечит дальнейшую недееспособность минного комплекса. Такой способ применяется к неконтактным минам – так, для срабатывания взрывателя акустических мин необходимо создать шум винтов корабля, что может быть реализовано с помощью имитатора первичного акустического поля; для срабатывания магнитных мин, соответственно, нужно создать некоторое магнитное поле, что реализуется при помощи установки на аппарат электромагнита. Необходимо отметить, что создаваемое магнитное поле должно быть достаточно велико, чтобы вызвать срабатывание взрывателя на безопасном от аппарата расстоянии во избежание его повреждения ударной волной от разрыва мины.

Таким образом, система нейтрализации мин в конечном итоге должна представлять собой некоторый комплекс средств, работающий по целеуказанию от поисковой системы и направленный на контактное и неконтактное срабатывание взрывателей мин – т. е. обеспечение аппарата зарядом взрывчатого вещества и агрегатами, формирующими различные ФПК.

Основы оптимального конструктивного исполнения противоминных АНПА. Как было отмечено ранее, оптимальный способ построения противоминного АНПА – это модульная технология, такой способ при соблюдении определенных геометрических и весовых соотношений позволяет обеспечить необходимые параметры прочности, жесткости и плавучести конструкции, а также минимизировать сопротивление при движении АНПА.

Прочность противоминного АНПА определяется способностью выдерживать гидростатическое давление и воздействие от разрывов мин и обеспечивается соответствующим выбором материала изготовления и формы прочного корпуса

(ПК). Прочный корпус аппарата предназначен для размещения всех необходимых систем и механизмов, которые должны быть отделены от воздействия внешней среды – в случае модульного построения ПК представляет собой несколько водонепроницаемых прочных контейнеров определенной формы. Таким образом, ПК должен обеспечивать герметичность, обладать надлежащей устойчивостью к динамическим и статическим нагрузкам, иметь минимальное количество межотсечных и межкорпусных отверстий при требовании минимизации его массогабаритных характеристик (МГХ) [22].

Как показано в [23], выбор материала и формы ПК определяется назначением АНПА, глубиной погружения, условиями работы и пр. Так, форма ПК противоминного АНПА, действующем на глубинах, не превышающих 600 м, выбирается цилиндрической, а в качестве материалов для создания ПК в основном применяется высокопрочная сталь, алюминиевые сплавы и композиционные материалы. Для оптимального выбора приведена таблица с характеристиками некоторых материалов (табл. 1) [13].

Важным параметром при выборе материала изготовления корпуса аппарата служит стойкость к взрыву, поскольку в случае подрыва мины вблизи АНПА, его конструкция должна выдержать воздействие подводной ударной волны. Также необходимо отметить, что материал изготовления корпуса аппарата должен соответствовать не только надежности и прочности, но и экономичности. Таким образом, учитывая условия работы, специфическое назначение аппарата и приведенные данные табл. 1, для проектирования и дальнейшего построения противоминных АНПА в

качестве оптимального материала предпочтительно использовать высокопрочные взрывостойкие стали с высоким пределом текучести. Таким материалом, к примеру, служит низкоуглеродистая хромоникельмолибденовая сталь АК-25 и ее модификации АК-27, АК-28, а также азотосодержащие сплавы, такие как ННЗБ – им свойственны высокие механические характеристики, необходимая прочность, взрывостойкость, немагнитность, а также этот материал обладает устойчивостью к разрушающему химическому воздействию забортной воды и при этом имеет приемлемую стоимость [24].

Чтобы обеспечить необходимую прочность, жесткость и устойчивость обшивки ПК, необходимо предусмотреть в конструкции применение шпангоутов – поперечных кольцеобразных элементов – «ребер» обшивки корпуса, которые принимают на себя воздействие гидростатического давления. Такие элементы устанавливаются равномерно по всему корпусу, вследствие чего устойчивость конструкции возрастает примерно в 100...200 раз. Шпангоуты выполняются из того же материала, что и ПК аппарата. Еще одна характеристика АНПА, плавучесть, обеспечивается ввиду оптимального построения прочного корпуса, а также применения дополнительных блоков плавучести из специальных материалов, имеющих малый удельный вес [13], [22].

Также очень важным параметром для любого подводного аппарата является обтекаемость его легкого корпуса (ЛК), обеспечивающая оптимальные мореходные качества, т. е. минимальное гидродинамическое сопротивление при движении аппарата, а также, как следствие, необходимую скорость хода. Помимо условия по необходимой

Характеристики материалов
Characteristics of materials

| Материал | Предел текучести σ_T , МН/м ² | Предел прочности σ_B , МН/м ² | Модуль упругости E , ГН/м ² | Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³ | Удельная прочность σ_T/ρ |
|-------------------------|---|---|--|---|------------------------------------|
| Сталь АК-25 | 590...740 | около 460 | 163...198 | 7.82 | около 2300 |
| Сталь ННЗБ | около 490 | 736...687 | – | 7.8 | – |
| Алюминиевые сплавы | 204...506 | 274...562 | 71–74 | 2.7...2.8 | 730...1820 |
| Чистый титан | 352 | 5150 | 0.1 | 4.5 | 780 |
| Титановые сплавы | 840...1050 | 8830...12 000 | 0.10...0.12 | 4.5 | 1860...2340 |
| Стеклокерамика | – | – | 80...140 | 2.6 | – |
| Акриловый пластик | – | 600 | 24 | 1.1 | 5500 |
| Армированные пластмассы | – | 330 | 18...210 | 1.7...2.2 | 1500...1900 |

обтекаемости формы, к наружному корпусу АНПА также ставится требование по обеспечению размещения в нем необходимых междуортных систем и устройств. Обращаясь к вопросу о материале изготовления ЛК, следует отметить, что он не подвержен воздействию внешнего давления воды, прочность его рассчитывается исходя из нагрузок, создаваемых ударами волн о корпус или же при покладке на грунт. При выборе материала следует обращать внимание на минимизацию массы всей конструкции, вследствие чего ЛК исполняется тонким стальным листом. В рассматриваемом случае, поскольку противоминный АНПА действует на мелких глубинах, для снижения его МГХ оптимально выполнить ЛК легкой стальной оболочкой и предусмотреть некую рамную структуру, за которой закреплялся бы ПК аппарата [25].

Заключение. Таким образом, наиболее эффективным средством ПМО являются АНПА с определенным построением и конструктивным исполнением – для решения задач поиска и уничтожения мин должны быть предусмотрены системы, обеспечивающие само функционирование аппарата, а также определенный комплекс, решающий задачи по назначению. Поисковая система, отвечающая заданным требованиям высокой вероятности правильного обнаружения и низкой вероятности ложных тревог, представляет собой

комплекс гидроакустических средств, а именно ГБО, ГСО и МЛЭ, а также дополнительные средства – телевизионная камера, гарантирующая максимально эффективный поиск и идентификацию объектов. Система нейтрализации мин – это комплекс средств, вызывающий контактное и неконтактное срабатывание взрывателей мин, что обеспечивается снабжением аппарата отдельной боевой частью с кумулятивным или фугасным зарядом, который сбрасывается на мину для ее уничтожения, а также отделяемыми одноразовыми самоходными НПА с зарядом взрывчатого вещества – при контактном воздействии; в случае неконтактного воздействия АНПА снабжается агрегатами, формирующими различные ФПК.

Оптимальный вариант построения противоминных АНПА обеспечивается применением модульной технологии при разработке ПК аппарата с определенным выбором материала. Так, для обеспечения необходимой прочности и надежности АНПА с минимизацией его МГХ и обеспечением экономичности разработки, при данных условиях работы и согласно его назначению, в качестве оптимального материала следует рассматривать высокопрочные стали, из которых наиболее предпочтительна марка АК-25, возможно также применение стали ННЗБ.

Список литературы

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 409 с.
2. Быстров Б. В., Бобрышев С. В. Морское минное оружие – безальтернативный компонент военно-морского потенциала России // Морской сб. 2017. № 6(2043). С. 67–71.
3. Дудкин А. А., Степанов Д. А., Сокол А. С. История возникновения и применения морских робототехнических комплексов военного назначения для ведения противоминных действий // Морской сб. 2018. № 6(2055). С. 73–77.
4. Аспекты совершенствования противоминных сил и средств Военно-морского флота России / Б. В. Быстров, К. В. Кулешов, В. А. Пироженок, М. А. Светлов // Морской сб. 2017. № 10(2047). С. 46–51.
5. Королев В., Усов И. Противоминная самооборона корабля // Морской сб. 1998. № 6(1819). С. 29–31.
6. Косинов Е. Искатели-обнаружители донных мин // Морской сб. 1998. № 6(1819). С. 65–67.
7. Красильников Р. В. Системы борьбы с необитаемыми аппаратами – асимметричный ответ на угрозы XXI века. СПб.: Инфо-да, 2013. 106 с.
8. Черкасов С. М. Развитие системы минно-тральных сил ВМФ // Морской сб. 2014. № 8(2009). С. 55–61.
9. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение: электрон. журн. 2013. № 5. С. 79–88.
10. Николаев А. Б. Морская военная робототехника: современное состояние и перспективы // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1 (14). С. 9–21.
11. Лукашов С. И. Иностранная военно-морская хроника // Морской сб. 2021. № 4(2089). С. 79–80.
12. Королев В., Усов И. Некоторые аспекты борьбы с якорными минами // Морской сб. 1998. № 4. С. 59–61.
13. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1978. 237 с.
14. Бочаров Л. Ю. О некоторых тенденциях в развитии автономных необитаемых подводных аппаратов // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2013. Т. 5. С. 12–18.
15. Автоматические подводные аппараты / М. Д. Агеев, Б. А. Касаткин, Л. В. Киселев, Ю. Г. Молоков, Н. И. Рылов. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.

16. Агеев М. Д., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
17. Илларионов Г. Ю., Сидоренко В. В., Смирнов С. В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 31–39.
18. Лекомцев В. М., Титаренко Д. В. Гидроакустические средства визуализации для необитаемых подводных аппаратов // Морские информационно-управляющие системы. 2014. № 3(6). С. 14–19.
19. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Теоретическое и экспериментальное обоснование принципов построения гидролокаторов обзора донной обстановки // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 5/6. С. 5–14.
20. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС ведущих европейских стран // Зарубежное военное обозрение. 2016. № 3. С. 19–85.
21. Быстрова Н. А., Добротин Д. Д., Шейнман Е. Л. Анализ и обработка сигналов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 144 с.
22. Прасолов С. Н., Амитин М. Б. Устройство подводных лодок. М.: Воениздат, 1973. 311 с.
23. Самоходные необитаемые подводные аппараты / Ю. А. Боженков, В. М. Гаврилов, Ю. И. Жуков, И. Б. Иконников, И. В. Постников, В. И. Соловьев, Л. Н. Ушенин, Д. Н. Филиппов / под ред. И. Б. Иконникова. Л.: Судостроение, 1986. 264 с.
24. Горынин И. В., Малышевский В. А., Рыбин В. В. Высокопрочные свариваемые корпусные стали для подводного кораблестроения: вчера, сегодня, завтра // Роль российской науки в создании отечественного подводного флота. М.: Наука, 2008. С. 281–288.
25. Большаков Ю. И. Элементарная теория подводной лодки. М.: Воениздат, 1977. 135 с.

Информация об авторах

Вагин Антон Владимирович – аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: av.vagin@bk.ru

Воротынцева Алена Сергеевна – студентка гр. 8586, кафедра ИИСТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

References

1. Koryakin Ju. A., Smirnov S. A., Yakovlev G. V. Korabel'naja gidroakusticheskaja tekhnika. Sostojanie i aktual'nye problemy. SPb.: Nauka, 2004. 409 s. (In Russ.).
2. Bystrov B. V., Bobryshev S. V. Morskoe minnoe oruzhie – bezal'ternativnyj komponent voenno-morskogo potentsiala Rossii // Morskoj sb. 2017. № 6(2043). P. 67–71. (In Russ.).
3. Dudkin A. A., Stepanov D. A., Sokol A. S. Istorija vozniknovenija i primenenija morskikh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznachenija dlja vedenija protivominnyh dejstvij // Morskoj sb. 2018. № 6(2055). P. 73–77. (In Russ.).
4. Aspekty sovershenstvovanija protivominnyh sil i sredstv VoЕННО-morskogo flota Rossii / B. V. Bystrov, K. V. Kuleshov, V. A. Pirozhenko, M. A. Svetlov // Morskoj sb. 2017. № 10(2047). С. 46–51. (In Russ.).
5. Korolev V., Usov I. Protivominnaja samooborona korablja // Morskoj sb. 1998. № 6(1819). P. 29–31.
6. Kosinov E. Iskateli-obnaruzhiteli donnyh min // Morskoj sb. 1998. № 6(1819). P. 65–67. (In Russ.).
7. Krasil'nikov R. V. Sistemy bor'by s neobitaemyimi apparatami – asimmetrichnyj otvet na ugrozy XXI veka. SPb.: Info-da, 2013. 106 s. (In Russ.).
8. SHERkasov S. M. Razvitie sistemy minno-tral'nyh sil VMF // Morskoj sb. 2014. № 8(2009). P. 55–61. (In Russ.).
9. Belousov I. Sovremennye i perspektivnye neobitaemye podvodnye apparaty VMS SSHA // Zarubezhnoe voennoe obozrenie: jelektron. zhurn. 2013. № 5. P. 79–88. (In Russ.).
10. Nikolaev A. B. Morskaja voennaja robototekhnika: sovremennoe sostojanie i perspektivy // Robototekhnika i tekhnicheskaja kibernetika. 2017. № 1 (14). P. 9–21. (In Russ.).
11. Lukashov S. I. Inostrannaja voenno-morskaja hronika // Morskoj sb. 2021. № 4(2089). P. 79–80. (In Russ.).
12. Korolev V., Usov I. Nekotorye aspekty bor'by s jakornymi minami // Morskoj sb. 1998. № 4. P. 59–61. (In Russ.).
13. Dmitriev A. N. Proektirovanie podvodnyh apparatov. L.: Sudostroenie, 1978. 237 s. (In Russ.).
14. Bocharov L. Yu. O nekotoryh tendencijah v razvitii avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov // Tekhnicheskie problemy osvoenija Mirovogo okeana. 2013. Vol. 5. P. 12–18. (In Russ.).
15. Avtomaticheskie podvodnye apparaty / M. D. Ageev, B. A. Kasatkin, L. V. Kiselev, YU. G. Molokov, N. I. Rylov. L.: Sudostroenie, 1981. 224 s. (In Russ.).
16. Ageev M. D., Kiselev L. V., Matvienko JU. V. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii. M.: Nauka, 2005. 398 s. (In Russ.).
17. Illarionov G. Ju., Sidorenko V. V., Smirnov S. V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty dlja poiska i unichtozhenija min // Podvodnye issledovanija i robototekhnika. 2006. № 1. P. 31–39. (In Russ.).

18. Lekomcev V. M., Titarenko D. V. Gidroakusticheskie sredstva vizualizacii dlja neobitaemyh podvodnyh apparatov // Morskie informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2014. № 3(6). P. 14–19. (In Russ.).

19. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie principov postroenija gidrolokatorov obzora donnoj obstanovki // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. Vol. 15, № 5/6. P. 5–14. (In Russ.).

20. Belousov I. Sovremennye i perspektivnye neobitaemye podvodnye apparaty VMS vedushchih evropejskih stran // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. 2016. № 3. P. 19–85. (In Russ.).

21. Bystrova N. A., Dobrotin D. D., SHejman E. L. Analiz i obrabotka signalov: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2018. 144 s. (In Russ.).

22. Prasolov S. N., Amitin M. B. Ustrojstvo podvodnyh lodok. M.: Voenizdat, 1973. 311 s. (In Russ.).

23. Samohodnye neobitaemye podvodnye apparaty / JU. A. Bozhenov, B. M. Gavrilov, JU. I. ZHukov, I. B. Ikonnikov, I. V. Postnikov, V. I. Solov'ev, L. N. Ushe- nin, D. N. Filippov / pod red. I. B. Ikonnikova. L.: Su- dostroenie, 1986. 264 s. (In Russ.).

24. Gorynin I. V., Malyshevskij V. A., Rybin V. V. Vyso- koprochnye svarivaemye korpusnye stali dlja podvod- ного korablestroenija: vchera, segodnja, zavtra // Rol' rossijskoj nauki v sozdanii otechestvennogo podvodnogo flota. M.: Nauka, 2008. P. 281–288. (In Russ.).

25. Bol'shakov JU. I. Jelementarnaja teorija podvod- noj lodki. M.: Voenizdat, 1977. 135 s. (In Russ.).

Information about the authors

Anton V. Vagin – postgraduate student, assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: av.vagin@bk.ru

Alena S. Vorotynseva – student gr. 8586 of the Department of IIST of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2022; принята к публикации после рецензирования 13.01.2023; опубликована онлайн 25.04.2023.

Submitted 17.12.2022; accepted 13.01.2023; published online 25.04.2023.
