

Лысенко Игорь Васильевич

Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН.

E-mail: ilya@ias.spb.su.

199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39.

Тел.: 88123283257; факс: 88123284450.

Птушкин Анатолий Иванович

E-mail: a.ptushkin@yandex.ru.

Соколов Борис Владимирович

E-mail: sokol@ias.spb.su.

Lysenko Igor Vasilievich

Institution of the Russian Academy of Sciences St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS).

E-mail: ilya@ias.spb.su.

14-th Line, 39, Saint-Petersburg, 199178, Russia.

Phone: 88123283257; fax: 88123284450.

Ptushkin Anatoly Ivanovich

E-mail: a.ptushkin@yandex.ru.

Sokolov Boris Vladimirovich

E-mail: sokol@ias.spb.su.

УДК 621.865.8-182.3

В.Х. Пшихопов, С.Я. Суконкин, Д.Ш. Нагучев, В.В.Стракович,

М.Ю. Медведев, Б.В. Гуренко, В.А. Костюков, Ю.П. Волощенко

**АВТОНОМНЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ «СКАТ» ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧ ПОИСКА И ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАИЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

В данной работе рассматривается проект автономного подводного аппарата для задач поиска и обнаружения заиленных объектов. В качестве носителя используется подводный аппарат торпедообразной формы с одним движителем. Предлагается система управления, включающая векторный регулятор и нелинейный наблюдатель. Для отработки систем управления предлагается программный комплекс моделирования движения подводных аппаратов. В качестве спецагрузки используется профилограф.

Автономный подводный аппарат.

V.Kh. Pshikhopov, S.J. Sukonkin, D.S. Naguchev, V.V. Strakovich,

M.Yu. Medvedev, B.V. Gurenko, V.A. Kostjukov, J.P. Voloshchenko

**AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE "SKAT" FOR SEARCH AND
DETECTION SILTY OBJECT TASKS**

In the given work the project of an autonomous underwater vehicle for search and detection silty object tasks is considered. As the carrier the underwater vehicle torpedo-like forms with one propeller is used. The control system including a vector regulator and the nonlinear observer is offered. To check of efficiency of control systems the program for modelling of movement of underwater vehicles is used. In quality work load the profilograph is used.

An autonomous underwater vehicle

Введение. Современные подводные аппараты способны выполнять широкий круг задач, в который входят экологический и климатический мониторинг, океа-

нологические исследования, обслуживание глубоководных систем и объектов, поиск подводных месторождений, охрана акваторий и др. Все эти задачи наиболее эффективно могут быть решены в классе автономных подводных аппаратов (АПА), использование которых позволяет сократить эксплуатационные расходы, снизить вероятность ошибки за счет уменьшения влияния человека-оператора на процесс управления, повысить время непрерывной работы, уменьшить массогабаритные параметры подводной техники.

Широкое применение АПА нашли в обзорно-поисковых операциях, требующих организации точных движений вдоль заданных траекторий, определяемых алгоритмом поиска. Соответственно, при конструировании АПА их структура должна отражать характер решаемых задач и требования к их отработке, учитывать состояние внешней среды и воздействие внешних возмущений.

1. Носитель. Для создания АПА, способного выполнить поставленную задачу поиска и обнаружения, специалистами ОКБ океанологической техники РАН был предложен проект носителя, представленный на рис. 1.

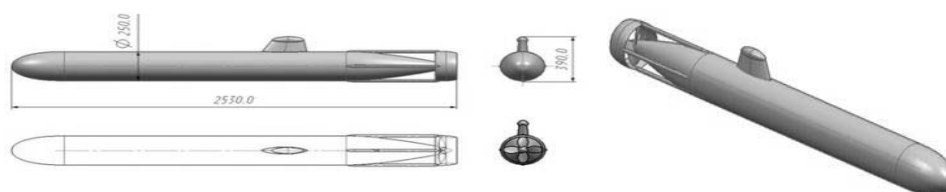


Рис. 1. Внешний вид носителя для АПА

Сравнение его основных технических характеристик с зарубежными аналогами приведено в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики АПА

| Технические характеристики | Модель АПА | | |
|----------------------------|------------|-------|-------|
| | Gavia | Remus | СКАТ |
| Рабочая глубина, м | <1000 | <600 | <1000 |
| Диаметр, м | 0,20 | 0,32 | 0,25 |
| Длина, м | 2,70 | 3,25 | 2,53 |
| Масса, кг | 70 – 80 | 240 | 100 |
| Скорость, м/с | 2,8 | 2,3 | 3 |
| Автономность, ч | 4-5 | 5 | 5 |

По основным техническим характеристикам предлагаемый носитель не уступает зарубежным аналогам.

2. Структура АПА. Состав подсистем, включаемых в состав АПА, представлен на рис.2 [1, 2]. Система управления должна обеспечивать выполнение поставленной задачи, т.е. движение вдоль заданных траекторий, а так же поддерживать необходимое маневрирование АПА в среде со стационарными и нестационарными препятствиями. Двигательно-рулевой комплекс осуществляет функции исполнительных механизмов. Система гидроакустической связи служит для получения информации с АПА, а также для передачи на борт необходимых сигналов и данных. Гидроакустический навигационный комплекс, совместно с бортовой навига-

ционной системой, обеспечивает точность определения координат посредством комплексирования данных. Для корректного планирования траекторий движения АПА может оснащаться системой технического зрения (СТЗ), включающей в себя видеосистему, гидролокаторы бокового и переднего обзора. В систему поиска АПА может входить гидроакустический маяк или система радиосвязи.



Рис. 2. Структура автономного подводного аппарата

Кроме того, в состав оборудования АПА включены элементы спецнагрузки, такие как профилограф, магнитометрические и электромагнитные датчики.

3. Система управления. Проектирование системы управления АПА предполагает построение его математической модели, адекватно отражающей нелинейность динамики движения, нестационарность параметров модели, многосвязность объекта управления, а также взаимодействие корпуса с вязкой средой.

Математическая модель ПА, с учетом известных уравнений твердого тела, в матричной форме представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= M^{-1}(F_u - F_d - F_v), \\ \dot{\delta} &= KU, \\ \dot{Y} &= \Sigma(\Theta, x) = \begin{pmatrix} \Sigma_p(\Theta, x) \\ \Sigma_\Theta(\Theta, x) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

где x – m -вектор внутренних координат; M – $(m \times m)$ -матрица массоинерционных параметров, элементами которой являются масса, моменты инерции, присоединенные массы ПА; $F_u(x, Y, \delta, l, R)$ – m -вектор управляющих сил и моментов, здесь l – вектор конструктивных параметров, R – вектор гидродинамических сил и моментов; $F_d(x, Y, l)$ – m -вектор нелинейных элементов динамики ПА; F_v – m -вектор измеряемых и неизменяемых внешних возмущений; δ – m -вектор управляемых координат (углы отклонения рулей, управление тягой двигателя и т.п.); K – $(m \times m)$ -матрица коэффициентов управления; U – m -вектор управляющих воздействий; Y – n -вектор положения и ориентации связанной систе-

мы координат относительно базовой, $n \leq 6$; $\Sigma(\Theta, x)$ – n-вектор кинематических связей; $\Sigma_p(\Theta, x)$ – вектор линейных скоростей связанной системы координат относительно базовой; $\Sigma_\Theta(\Theta, x)$ – вектор угловых скоростей связанной системы координат относительно базовой.

Средствами пакета численного моделирования и исследования гидродинамических характеристик NUMECA International модель (1) была доопределена зависимостями коэффициентов лобового сопротивления (рис. 3,а), подъемной силы (рис. 3,б) и момента тангажа (рис. 3,в) от угла атаки.

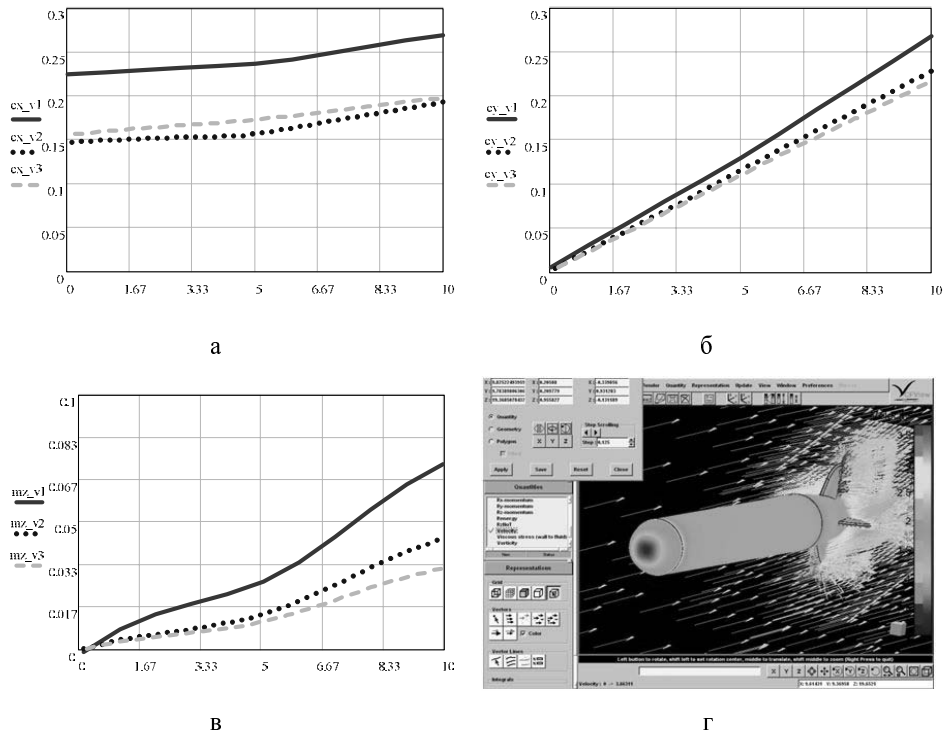


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов: а – лобового сопротивления от угла атаки; б – подъемной силы от угла атаки; в – момента тангажа от угла атаки; г – распределения скоростей в районе оперения МА

Полученная математическая модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, элементы которых определяются компоновкой и параметрами конкретного ПА, а также структурой и характером внешних возмущений.

В основе предлагаемой системы управления лежат структурно-алгоритмические решения автопилота и нелинейного наблюдателя, полученные в предыдущих работах авторов. Автопилот построен с применением подхода, представленного в [3,4,5], позволяющего учесть многосвязность и нелинейность математической модели АПА и не требующего обратных кинематических преобразований и наличия интерполяторов. Это позволяет расширить функциональные возможности аппарата и снизить погрешность обработки желаемых траекторий. Планировщик перемещений может быть реализован на базе нейросетевых технологий [1,6] и позволяет организовать перемещение АПА в априори неформализованных

средах. Наблюдатель служит для оценки неизмеряемых внутренних параметров системы, а также неизмеряемых внешних возмущений, действующих на АПА. Предлагается использовать нелинейные наблюдатели, описанные в работе [4, 7].

4. Исследование свойств системы управления. Для исследования поведения АПА был разработан программный комплекс, структура которого представлена на рис. 4.

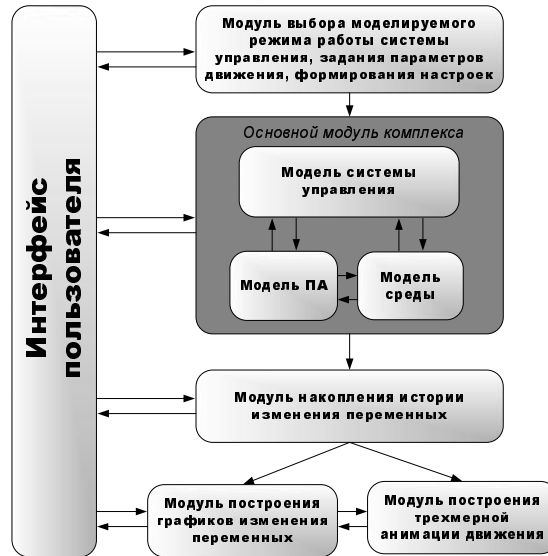


Рис. 4. Структура программного комплекса для моделирования движения АПА

Модуль выбора режима работы системы управления и задания параметров движения позволяют выбрать фазовые траектории движения АПА (перемещение вдоль заданной траектории с заданной скоростью, позиционирование в заданную точку и т.д.), настроить параметры моделирования и настроить соответствующие параметры.

После определения настроек и задания целей работы базового алгоритма данные передаются в основной модуль, где выполняется цикл моделирования, в котором участвуют модель системы управления, модель АПА, модель среды. Модель системы управления включает в себя математическое описание регулятора, реализующего заданный закон управления, модель планировщика, формирующего траекторию движения в соответствии с поставленным заданием, а также модель наблюдателя. Модуль трехмерной анимации движения использует созданную заранее сцену подводной среды для наглядного представления результатов моделирования движения и поведения АПА. Пример трехмерной сцены подводной среды приведен на рис. 5.

Для определения качества предлагаемой системы управления был проведен сравнительный анализ векторного регулятора, предложенного в [3], с линейным регулятором, синтезированным методом обратных задач динамики [8,9].

Закон управления в случае векторного регулятора формируется согласно следующему выражению [3]:

$$F_u = -M(\tilde{T}\tilde{A}K_0)^{-1}(K_1\dot{Y} + K_2(t) + \tilde{A}\tilde{V} + \Psi_{tr}) + F_d + \hat{F}_V, \quad (2)$$

где \hat{F}_V – оценка вектора неопределенных сил и моментов;

$M, \tilde{T}, \tilde{A}, K_0, K_1, K_2(t), \tilde{\Psi}$ – матрицы параметров объекта управления и функциональных коэффициентов настройки регулятора [3].

Результаты сравнения линейного и векторного регуляторов при высокой и низкой скорости движения АПА приведены на рис. 6 и 7.

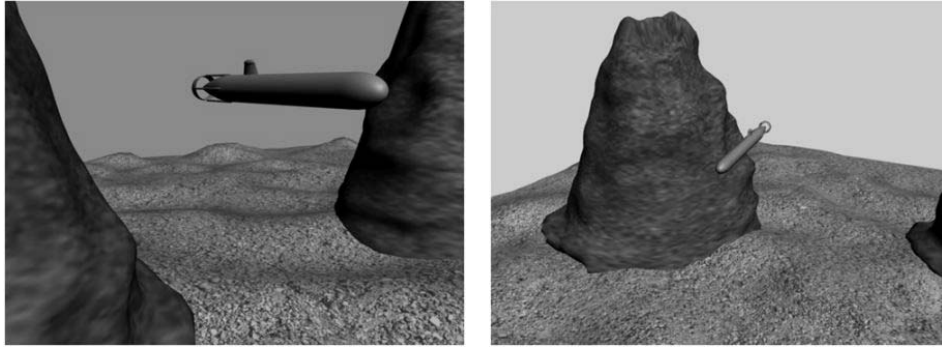


Рис. 5. Трехмерная сцена подводной среды

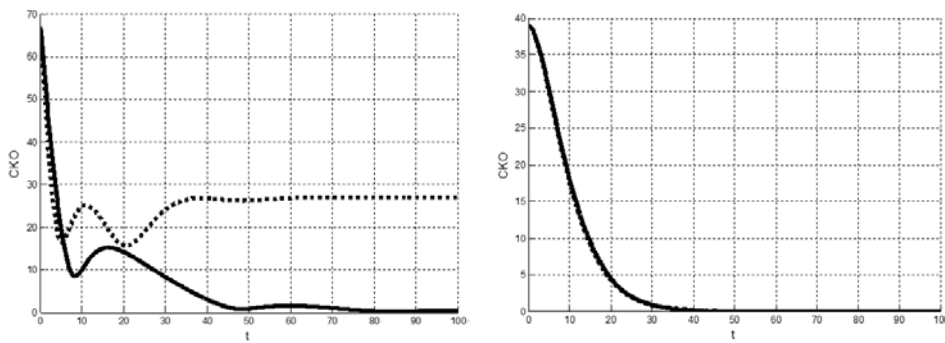


Рис. 6. СКО по траектории при высокой (пунктирная линия) и низкой (сплошная линия) скорости движения (слева – при линейном, справа – векторном регуляторах)

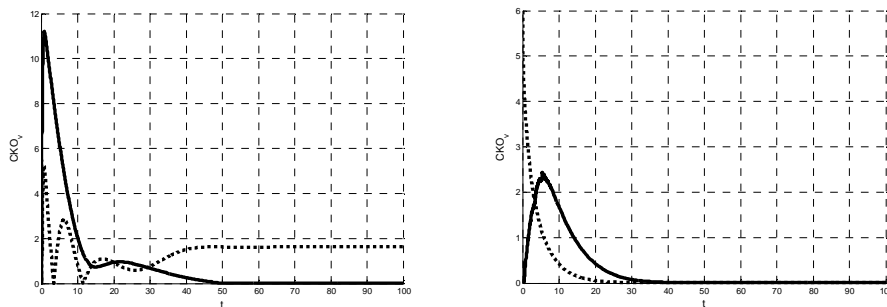


Рис. 7. СКО по скорости при высокой (пунктирная линия) и низкой (сплошная линия) скорости движения АПА (слева – линейный, справа – векторный регуляторы)

Как видно из результатов моделирования движения, линейный регулятор достаточно эффективно реализует поставленные задачи только при низких скоростях ($<0,5$ м/с). При увеличении скорости до 3-4 м/с линейный регулятор не может с достаточной точностью отработать ни заданную траекторию, ни заданную скорость.

При движении АПА часто подвергается воздействию внешних возмущений, таких как, например, струйные течения. В структуре предлагаемой системы управления присутствует наблюдатель, который компенсирует внешние возмущения в рамках энергетических возможностей АПА.

На рис. 8–11 представлены результаты моделирования движения АПА, на который в промежутке времени от 50 до 60 с действует течение постоянной амплитуды. Из результатов моделирования видно, что в случае отсутствия наблюдателя, возникает ошибка по скорости и координатам, а при его использовании возмущения эффективно парируются.

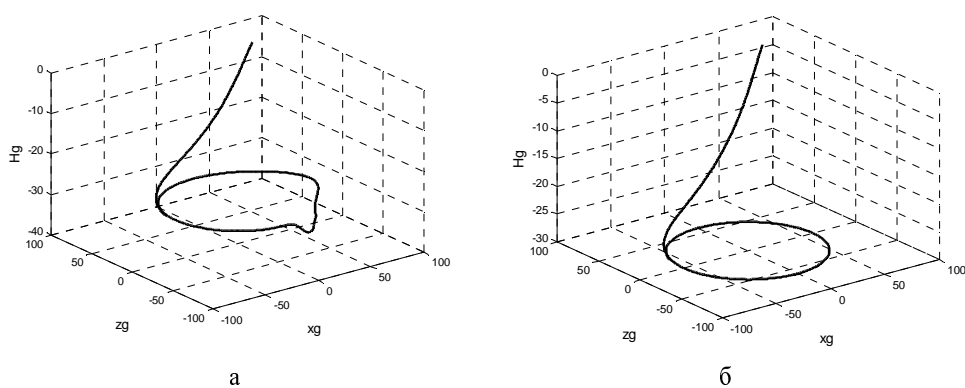


Рис. 8. Траектория движения АПА: а – без наблюдателя; б – с наблюдателем

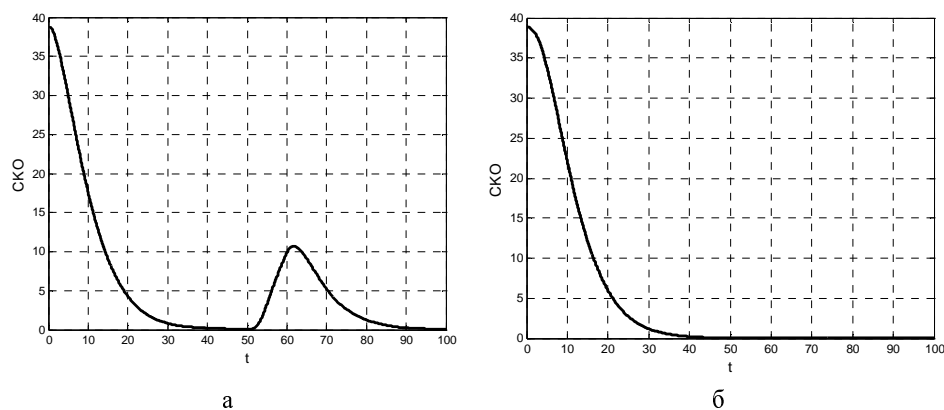


Рис. 9. СКО по траектории: а – без наблюдателя; б – с наблюдателем

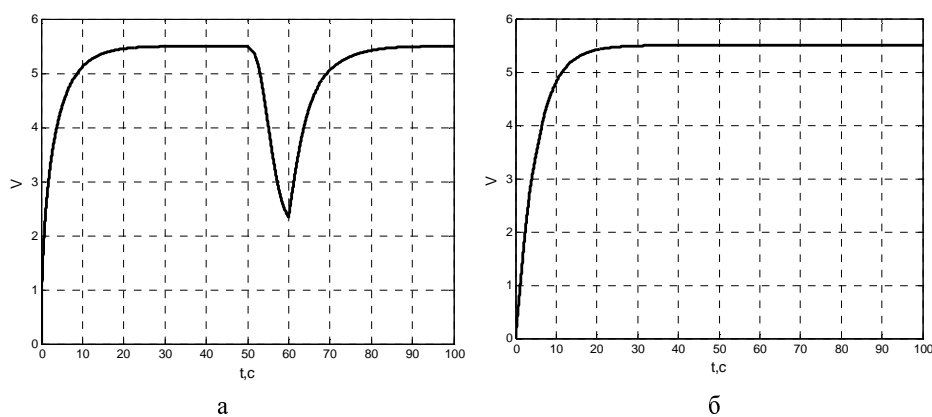


Рис. 10. Скорость движения: а – без наблюдателя; б – с наблюдателем

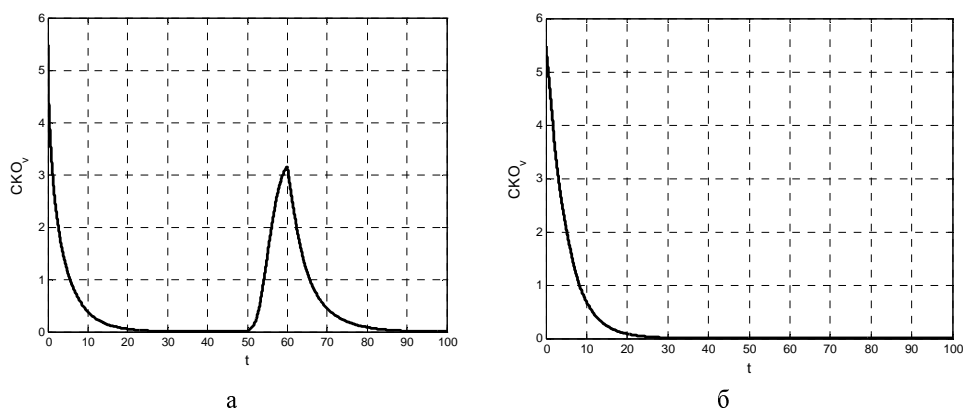


Рис. 11. СКО по скорости движения: а – без наблюдателя; б – с наблюдателем

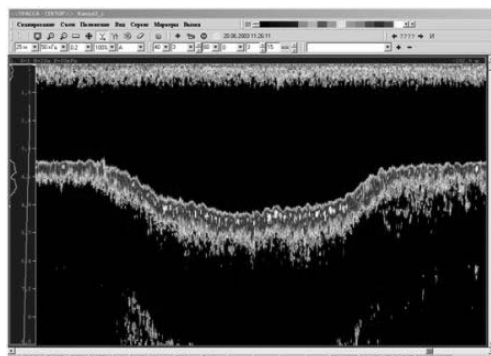
5. Спецнагрузка. В качестве спецнагрузки в состав АПА включен профилограф «Зонд», спроектированный специалистами ОКБ «РИТМ» ЮФУ. Профилограф необходим для поиска и обнаружения заиленных объектов, находящихся под дном водоемов. Конструктивно аппаратная часть размещается на борту аппарата в цилиндрическом объеме длиной 1250 мм и диаметром 200 мм. Антенны размером 400 x 180 мм устанавливаются на дне аппарата. Сравнительные характеристики профилографа «Зонд» приведены в табл. 2. Из табл. 2 следует, что проникновение под грунт на глубину до 30 м обеспечивает только профилограф «Зонд». Следует отметить также его высокую скорость сканирования, которая может составлять 2 кв. км в час.

В профилографе «Зонд» имеется привязка гидроакустических данных к системе географических координат WGS-84, а также возможность обмена данными с корабельной системой позиционирования (DGPS или ГЛОНАС). При обработке и отображении гидроакустических данных есть режим учета вертикальных и поперечных перемещений подводного аппарата. Предусмотрена возможность обмена информационными данными с гидролокатором бокового обзора или многолучевым промерным эхолотом по интерфейсу Ethernet.

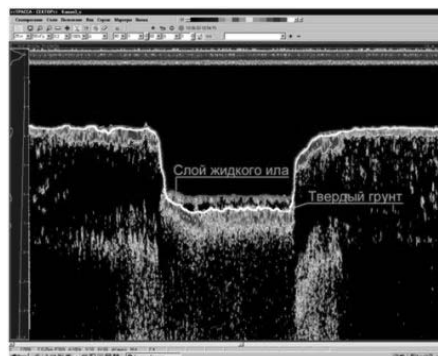
Таблица 2

Сравнительные характеристики гидроакустических профилографов

| Показатели | Модель профилографа | | | |
|--|---------------------------------------|---|---|---|
| | «Зонд» | EA 400SP | ПГ-30 | SB-424 |
| Способ формирования зондирующих сигналов | Нелинейный (параметрический) | Линейный | Нелинейный (параметрический) | Линейный |
| Рабочие глубины, м | До 350 | Нет данных | 100 | До 300 |
| Сектор обзора, градусы | 30 | 3,5 | 8 | 23 |
| Наличие или отсутствие фронтального разрешения | да | нет | нет | нет |
| Разрешение по дистанции, м | 0,08 | 0,1 | 0,1 | 0,08 |
| Проникновение в грунт, м | Не менее 5 (до 30 м в илистом грунте) | 0-8 | 25 | Не менее 2 (до 20 м в илистом грунте) |
| Наличие или отсутствие режима классификации типа грунта по комплексному коэффициенту отражения | Да | Нет (только по амплитуде отраженного сигнала) | Нет (только по амплитуде отраженного сигнала) | Нет (только по амплитуде отраженного сигнала) |
| Масса, кг | не более 30 | 35 | 50 | 45 |
| Скорость носителя | До 8 узлов | Нет данных | Нет данных | Нет данных |



Профиль канала до проведения дноуглубительных работ



Профиль канала после дноуглубительных работ

Рис. 12. Эхограмма судоходного канала

На эхограммах, приведенных на рис. 12, видно, как отличается слой жидкого грунта на дне судоходного канала от более твердого слоя, лежащего ниже. Погрешность определения глубины, а также толщины того или иного слоя не превышает 5 см.

Приведенная структура АПА позволяет изменять его целевое назначение посредством использования необходимой спецнагрузки.

Заключение. В статье представлен проект автономного подводного аппарата для решения задач поиска и обнаружения затонувших объектов.

Интеграция участников этого проекта и их научно-технический потенциал позволят создать перспективный образец автономного подводного аппарата с характеристиками мирового уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пишихов В.Х., Сиротенко М.Ю., Гуренко Б.В.* Структурная организация систем автоматического управления подводными аппаратами для априори неформализованных сред // Информационно-измерительные и управляющие системы. Интеллектуальные и адаптивные роботы. – М.: Изд-во «Радиотехника». 2006. – № 1-3. – Т. 4. – С.73-79.
2. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под ред. Агеева М.Д.. – М.: Наука, 2005.
3. *Пишихов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 183.
4. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оценением возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С.103-109.
5. *Пишихов В.Х.* Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Перспективные системы и задачи управления». – 2006. – № 3 (58). – С. 117-123.
6. *Пишихов В.Х., Сиротенко М.Ю.* Структурно-алгоритмическая реализация системы управления автономным мобильным роботом с нейросетевым планировщиком перемещений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». – 2004. – № 3 (38). – С. 185-190.
7. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Перспективные системы и задачи управления». – 2010. – № 3(104). – С. 187-197.
8. *Галицуллин А.С.* Методы решения обратных задач динамики. – М.: Наука, 1986. – 224 с.
9. *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – М.: Наука, 1988.
10. *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Устройства и системы управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005.
11. *Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В.* О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника – 2006. – № 2. – С. 13-26.
12. *Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Сидоренко А.В., Хмельков Д.Б.* Архитектурные конфигурации систем управления АНПА // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 18-30.

Пишихов Вячеслав Хасанович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: pshichor@gambler.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371694.

Медведев Михаил Юрьевич

E-mail: ms@pisem.net.

Гуренко Борис Викторович
E-mail: boris.gurenko@gmail.com.

Костюков Владимир Александрович
E-mail: wkost-einheit@yandex.ru.

Волощенко Юрий Петрович
E-mail: yvoloshchenko@yandex.ru.

Суконкин Сергей Яковлевич
Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Опытно-Конструкторское Бюро
Океанологической Техники Российской Академии Наук.
E-mail: okb@edboe.ru.
109387, г. Москва, Летняя ул., д. 1, корп. 2.
Тел.: 84953502612.

Нагучев Даулет Шабанович
Особое конструкторское бюро «Ритм» Южного федерального университета.
E-mail: main@ritm.tsure.ru.
347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 99.
Тел.: 88634311933; 88634383108; 88634623386.

Стракович Владимир Васильевич
ОАО "ТЕТИС - Комплексные системы".
г. Москва, район Южное Бутово, ул. Поляны, д. 54.
E-mail: sec@tetis-ks.ru.
Тел.: 84957869858.

Pshihopov Vjacheslav Hasanovich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of
Higher Vocational Education “Southern Federal University”.
E-mail: pshichop@rambler.ru.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 88634371694.

Medvedev Mihail Jur'evich
E-mail: ms@pisem.net.

Gurenko Boris Viktorovich
E-mail: boris.gurenko@gmail.com.

Kostukov Vladimir Alexandrovich
E-mail: wkost-einheit@yandex.ru.

Voloshchenko Yuri Petrovich
E-mail: yvoloshchenko@yandex.ru.

Sukonkin Sergey Yakovlivich
Russian Academy of Sciences Experimental Design Bureau of Oceanological Engineering.
E-mail: okb@edboe.ru.
1/2, Letniaya street, Moscow, 109387, Russia.
Pone: 84953502612.

Naguchev Daulet Shabanovich
Special design office “RITM” of Southern Federal University.
E-mail: main@ritm.tsure.ru.
99, Petrovskaja street, Taganrog, 347900, Russia.
Phone: 88634311933; 88634383108; 88634623386.

Strakovich Vladimir Vasil'evich
Public corporation “TESIS – Complex systems”.
54, Polyani street, Uzhnoe Butovo, Moscow, Russia.
E-mail: sec@tetis-ks.ru.
Phone: 84957869858.