

УДК 629.127.4-52:62.501.55-531.501  
DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.001

**Ключевые слова:** необитаемый подводный аппарат, регулирование плавучести, движительно-рулевой комплекс, глубина погружения, бассейновые испытания.

Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. УПРАВЛЕНИЕ ГЛУБИНОЙ ПОГРУЖЕНИЯ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА, ОСНАЩЕННОГО СИСТЕМОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛАВУЧЕСТИ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 4–11.

Динамические свойства и энергозатраты на движение необитаемого подводного аппарата (НПА) в режимах позиционирования существенно зависят от переменной величины остаточной плавучести, которая определяется также водоизмещением аппарата и плотностью воды. В связи с этим актуальна задача разработки комбинированных методов управления глубиной погружения НПА, оснащенных движительно-рулевым комплексом (ДРК) и системой регулирования плавучести (СРП). Эффективность предлагаемых методов сравнивается по двум параметрам: времени переходного процесса в системе стабилизации глубины и энергии, затрачиваемой на движение. Дан анализ величины электрической мощности, необходимой для стабилизации глубины погружения после завершения переходного процесса. Для управления глубиной погружения используется ПИД-регулятор с нелинейной интегральной компонентой. Исследование алгоритмов управления проведено на основе результатов бассейновых испытаний АНПА, оснащенного ДРК и СРП.

УДК 531.391.1:532.5.011  
DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.002

**Ключевые слова:** задача Рауса–Аппеля, укладка кабеля, механика нити, гидродинамические силы сопротивления, численное моделирование, явный метод Эйлера, итерационный метод Ньютона, буксировка, швартование.

Керестень И.А., Михайлов А.А., Войнов И.Б., Боровков А.И. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УКЛАДКИ РАСТЯЖИМОГО КАБЕЛЯ НА ДНО МОРЯ С ДВИЖУЩЕГОСЯ СУДНА С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДЫ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 12–20.

Статья посвящена численному моделированию укладки кабеля на дно моря в постановке задачи, известной как задача Рауса–Аппеля. Целью работы является определение формы и натяжения кабеля при его уклад-

ке под водой на постоянную глубину. Рассматривается установившееся движение кабеля при его сматывании с катушки, установленной на движущемся с постоянной скоростью судне. В качестве модели кабеля рассматривается математическая модель абсолютно гибкой растяжимой однородной нити. Основными задачами работы являются: вывод дифференциальных уравнений установившегося движения кабеля с учетом влияния растяжимости на погонный вес и гидродинамических сил сопротивления воды; разработка численной модели укладки кабеля и выполнение серии расчетов по определению формы провисающей части кабеля и его натяжения при различных параметрах укладки кабеля. Результаты моделирования представлены в безразмерном виде для удобства их использования при анализе различных глубин укладки кабеля. Проведена верификация разработанной модели на примере нерастяжимого кабеля. Результаты хорошо совпадают с аналитическим решением Меркина. Проанализировано влияние скорости движения судна и параметров кабеля на исследуемые характеристики. Рассмотрено влияние подводного течения вблизи газового месторождения Ормен Ланге. Представленную модель и результаты моделирования укладки кабеля можно использовать для инженерной оценки прочности кабеля в рамках рассмотренной постановки задачи и принятых допущений.

УДК 629.127.4-52:62.501.55-531.501  
DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.003

**Ключевые слова:** автономный подводный робот (автономный необитаемый подводный аппарат), управление движением, траекторные измерения, навигация, гравиметрия, информативность.

Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Медведев А.В., Тарханов А.Е. О ГРАВИМЕТРИИ С БОРТА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА И ОЦЕНКАХ ЕЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДЛЯ НАВИГАЦИИ ПО КАРТЕ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 21–30.

Рассматриваются информационно-вычислительные модели маршрутизации движения автономного необитаемого подводного аппарата-робота (АНПА) при траекторных измерениях и картографировании локального гравитационного поля (ЛГП) и навигации по карте. Основные разделы работы посвящены решению задач маршрутизации движения АНПА при картографировании ЛГП, особенностям гравиметрии с борта АНПА, восстановлению карты аномального поля силы тяжести по данным траекторных измерений, оценкам информативности аномального поля силы тяжести для решения задачи навигации по карте. Обсуждаются алгоритмы привязки измеренного фрагмента поля к эталонной карте. Представлены вероятностные оценки информативности фрагмента поля с учетом усреднен-

ных ошибок гравиметрии, картографирования и инерциальной навигации. Полученные оценки основаны на теоретических исследованиях, результатах модельных вычислительных экспериментов и опытных испытаний систем АНПА в натуральных условиях.

УДК 629.58+62.529+004.896

DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.004

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат, распознавание подводных объектов, многолучевые 3D-сонары, облако точек, многозвенный манипулятор, траектория, подводные операции, программное обеспечение.

Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю., Шувалов Б.В. ПОДХОД К ВЫПОЛНЕНИЮ АНПА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 31–37.

Рассмотрен новый подход к решению исследовательских и технологических манипуляционных задач с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ). Разработанный подход предполагает построение математических моделей объектов работ с помощью облаков точек, получаемых от бортовых гидроакустических многолучевых 3D-сонаров или систем технического зрения. На основе полученных моделей автоматически формируются целевые точки и сложные пространственные траектории рабочих органов подводных ММ. При этом учитываются требования к выполнению конкретных манипуляционных операций. Кроме того, для определения местоположения и пространственной ориентации известных подводных объектов предлагается использовать их трехмерные модели, подвергающиеся дополнительной обработке и преобразованиям в облака точек. Эти облака совмещаются с облаками точек, принадлежащих реальному подводному объекту. На основе разработанного подхода создано программное обеспечение, позволяющее строить модели поверхности подводных объектов и рассчитывать пространственные траектории движения рабочих органов ММ, установленных на АНПА.

УДК 534.23

DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.005

**Ключевые слова:** комбинированный приемник, помехоустойчивость, инфразвуковой диапазон частот.

Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЁМНИКА В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 38–47.

Выполнена сравнительная оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника при различных алгоритмах обработки скалярных, векторных и тензорных параметров, характеризующих звуковое поле, формируемое шумовым объектом в инфразвуковом диапазоне частот. Показано, что реальные условия работы приёмной системы в инфразвуковом диапазоне частот принципиально отличаются от модельных условий свободного пространства. Как следствие, аддитивные алгоритмы обработки сигналов, которые традиционно считаются оптимальными, теряют свою эффективность, а эффективность мультипликативных алгоритмов обработки может быть увеличена путём увеличения объёма обрабатываемой информации. Приведены результаты обработки экспериментальных данных, подтверждающие существенное увеличение потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника при увеличении числа информативных параметров, характеризующих звуковое поле шумящего объекта в скалярно-векторном и тензорном описании.

УДК 681.884:534.873

DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.006

**Ключевые слова:** гидроакустика, псевдослучайные сигналы, подводная навигация.

Моргунов Ю.Н., Каменев С.И., Безответных В.В., Петров П.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ИМИ ГЛУБОКОВОДНЫХ МИССИЙ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 48–54.

На основе экспериментов, проведенных в сентябре 2017 г. в Японском море, обосновывается возможность позиционирования автономных подводных аппаратов при выполнении ими миссий на глубинах, существенно превышающих глубину оси подводного звукового канала (ПЗК). Результаты экспериментальных исследований эффекта фокусировки акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе в глубокое море для условий летне-осенней гидрологии сравниваются с расчётными данными. Эксперименты по приему широкополосных импульсных сигналов проводились на различных удалениях от источника навигационных сигналов (ИНС), установленного у побережья вблизи мыса Шульца. Для приема сигнальной информации была использована система с распределенными по глубине гидрофонами, обеспечивающая длительную регистрацию сигналов на фиксированных глубинах или в процессе погружения. В результате экспериментов были получены импульсные характеристики и рассчитаны эффективные скорости звука при приеме навигационных сигналов на глубинах до 500 м и на дистанциях до 200 км, показана применимость результатов к задачам позиционирования АНПА.

УДК 534.231

DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.007

**Ключевые слова:** векторно-скалярная приемная система, структурная помеха, отношение сигнал/помеха, поток мощности, плотность вероятности, метод случайных источников.

Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Харашьян А.М. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПОЛЯ СТРУКТУРНОЙ ПОМЕХИ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 55–61.

Для приемных систем, установленных на борту судна, одним из важнейших типов шумов, дающим значительный вклад в суммарное шумовое поле, является структурная помеха, создаваемая вибрациями элементов корпуса. Разработка, анализ и выбор эффективных алгоритмов обработки сигналов, базирующихся на измерении двух компонент поля, требует знания характеристик векторно-скалярного акустического поля шумов, на фоне которых выполняется обнаружение цели. Такие характеристики обнаружения приемных систем, как вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги, рассчитываются с использованием плотности вероятности сигналов и шумов. Поэтому особый интерес представляют статистические характеристики компонент векторно-скалярного поля. В работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик векторно-скалярного шумового поля на приемном элементе, установленном на борту носителя и состоящем из скалярного датчика и трех ортогональных векторных датчиков. Анализируются энергетические и статистические характеристики структурной помехи – как для скалярной и векторных компонент поля, так и для мультипликативной компоненты – потока мощности. Показано, что экспериментальные результаты совпадают с результатами компьютерного моделирования, полученными при расчете характеристик акустического поля методом случайных источников. Как следствие, рекомендуется при проектировании векторно-скалярных приемных систем, устанавливаемых на борту, использовать метод случайных источников, который значительно упрощает расчеты. На основе сравнительного анализа среднеквадратических ошибок оценки компонент поля показана высокая эффективность обнаружения локального источника сигналов при использовании мультипликативной компоненты акустического поля – потока мощности.

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.008

**Ключевые слова:** ветровая волна, период, вертикальная скорость, горизонтальная скорость, амплитуда, давление.

Будрин С.С., Долгих Г.И. РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОБЩЕЙ ФУНКЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА ДЛЯ ВОДОЕМА КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ МЕЛКОГО МОРЯ // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 62–67.

В результате обработки и анализа данных, полученных с лазерного гидрофона за 2010, 2012 и 2013 гг., была выведена общая функция изменения периода поверхностных гравитационных и ветровых морских волн на временных интервалах произвольной длины. Обсуждаются вопросы практического применения данной функции для расчетов основных характеристик волнения. Исходными данными для расчетов служат спектрограмма участка записи лазерного гидрофона и гидродинамическая модель распространения поверхностных волн в водоеме конечной глубины. Представлен метод расчета пространственно-временного распределения амплитуды давления, мгновенных значений горизонтальной и вертикальной скоростей, горизонтальных и вертикальных смещений частиц среды, вызванных поверхностным морским волнением, на произвольной глубине в приближении мелкого моря.

## ABSTRACTS

**Key words:** underwater vehicle, variable buoyancy system, propulsion system, depth control, pool tests.

Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. DEPTH CONTROL OF THE UNMANNED UNDERWATER VEHICLE EQUIPPED WITH THE BUOYANCY SYSTEM OPERATION // Underwater Investigation and Robotics. 2019. No. 1 (27). P. 4–11.

Dynamic properties and energy consumption for the movement of the unmanned underwater vehicle (UUV) in positioning modes substantially depend on the variable value of residual buoyancy, which is also determined by the displacement of the device and the density of water. In this regard, the urgent task of developing a combination of methods for controlling the depth of immersion of UUV, equipped with a propulsion and steering complex (PSC) and a variable buoyancy system (VBS). The effectiveness of the proposed methods is compared by two parameters: the time of the transition process in the system of stabilizing the depth and energy, spent on the movement. An analysis of the electrical power required to stabilize the depth of immersion after the completion of the transition process is given. A PID controller with a non-linear integral component is used to control the immersion depth. The study of control algorithms was carried out on the basis of the results of the UUV basin tests equipped with PSC and VBS.