

УДК 629.12

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ВООРУЖЕННОСТЬ МОРСКОЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ БЕСПИЛОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Алексей Валерьевич Титов

кандидат технических наук, директор Института морских технологий, энергетики и транспорта, председатель Астраханского отделения «Ассоциации инженерного образования России», зам. председателя НП СРО «Каспийская ассоциация аудиторов, энергоаудиторских и экспертных организаций», руководитель проекта «Морская многоцелевая беспилотная платформа», доцент кафедры «Эксплуатация водного транспорта»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: pochta_414000@list.ru

Аким Владимирович Павлов

генеральный директор АО «ХИМПЕТРО», главный конструктор проекта «Морская многоцелевая беспилотная платформа»
125080, г. Москва, шоссе Волоколамское, дом 1, строение 1, помещение VI
e-mail: pavlov.akim@gmail.com

Василий Александрович Чанчиков

кандидат технических наук, доцент кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: bazelius87@mail.ru

Николай Васильевич Селиванов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физика»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: selivanov@mail.ru

Аннотация

Авторами исследуется тематика морских роботизированных комплексов, использующих для движения жесткий парус крыло. Рассматривается безэкипажное парусное судно, оснащенное автономной системой управления и энергетическим парусом. Представлены основные проектные тактико-технические характеристики морской многоцелевой беспилотной платформы и её энерговооруженности. Энергетическое парус-крыло ММБП значительным образом повышает энергоэффективность и расширяет её функциональные возможности. Авторами проекта получен патент №184588 «Безэкипажное парусное судно». Кроме этого в рамках работы Каспийского распределенного центра «Маринет» авторы статьи приняли участие в экспедиции «Эковолна-2018», в которой удалось провести исследования, по фактически выполненным техническим решениям по проекту катамарана «Эковолна» с использованием оборудования от компаний «Лиотех», «МикроАрт» и «Хевел». В перспективе для большего повышения уровня энерговооруженности ММБП целесообразно рассмотреть возможность использования топливных элементов. Так в мире существует проект «Energy Odserver» с использованием в качестве движителя электрического двигателя на основе возобновляемых источников энергии и системы производства водорода (технология топливных элементов). Это является перспективным направлением проработки технических решений в рамках проектирования автономных надводных исследовательских безэкипажных судов.

Ключевые слова: морская многоцелевая беспилотная платформа, морской робот, морские надводные роботизированные комплексы, безэкипажное морское судно, жесткое парус-крыло, энергетический парус, энерговооруженность.

ENERGY EQUIPMENT OF UNMANNED MARINE MULTIPURPOSE PLATFORM

Alexey V. Titov

Cand. Sci. Tech., head of Institute of marine technology, energy and transport, Chairman of the Astrakhan regional branch of the Association of Engineering Education of Russia, Deputy Head of the Board of the Non-Profit Partnership «Caspian Association of auditors, energy auditing and expert organizations», Scientific Supervisor of the project «Marine Multipurpose Unmanned Platform», associate professor of department «Operation of water transport»
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: pochta_414000@list.ru

Akim V. Pavlov

General Director of JSC «HIMPETRO»,
Chief Designer of the project «Marine Multipurpose Unmanned Platform»
Volokolamskoe h., B 1/1, office VI, Moscow, 125080, Russian Federation,
e-mail: pavlov.akim@gmail.com

Vasily A. Chanchikov

Cand. Sci. Tech., associate professor of department «Shipbuilding and marine power engineering complexes»
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: bazelius87@mail.ru

Nikolai V. Selivanov

the professor, Dr. Sci. Tech., the professor of department «Physics»
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: selivanov@mail.ru

Abstract

The authors explore the subject of marine robotic systems that use a rigid sail wing to move. A crewless sailing ship equipped with an autonomous control system and an energy sail is considered. The main design tactical and technical characteristics of the marine multipurpose unmanned platform and its power supply are presented. The IMBP energy sail-wing significantly increases energy efficiency and extends its functionality. The authors of the project received a patent number 184588 "Unmanaged sailing vessel." In addition, in the framework of the Caspian distributed center "Marinet", the authors of the article took part in the Ekovolna-2018 expedition, in which they managed to conduct research on the technical solutions actually implemented for the Ekovolna catamaran project using equipment from Liotech companies MicroArt and Hevel. In the future, in order to increase the level of the power supply to the IMBP, it is advisable to consider the use of fuel cells. So in the world there is a project "Energy Odsver" with the use of an electric motor based on renewable energy sources and a hydrogen production system (fuel cell technology) as a propulsion unit. This is a promising direction for the development of technical solutions in the design of autonomous surface research unmanaged vessels.

Key words: sea multi-purpose unmanned platform, sea robot, sea surface robotized complexes, crewless sea vessel, rigid sail-wing, energy wings, power supply.

Введение

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» Институт морских технологий, энергетики и транспорта реализует в рамках Национальной технологической инициативы рабочей группы «Маринет» проект «Морская многоцелевая беспилотная платформа» (ММБП) [1]. ММБП приводится в движение за счёт силы ветра, используя энергетическое парус-крыло.

Все модификации оснащены композитным парусом-крылом, что обусловлено необходимостью долговечной работы и прочностью конструкции. Применение парус-крыла с полугибкими высокоэффективными гетероструктурными солнечными элементами даёт преимущество перед традиционным парусом, повышает надёжность, а так же учитывая аэродинамические свойства, повышает ходовые качества и энерговооружённость ММБП.

Выбор в качестве судового движителя жесткого паруса крыла связано со следующими особенностями исследовательской платформы: автономность плавания до 12 месяцев, энергетическая вооружённость до 2,5 кВт, массогабаритные характеристики (длина 5,5 м; ширина от 0,5 до 3 м; высота от 5 до 8 м; масса от

200 до 350 кг), наличие поверхностей для размещения гибких солнечных элементов, использование конструкции паруса в качестве фазированной антенны для приёма и передачи данных, радиопрозрачность платформы.



Рис. 1. Модификации морской многоцелевой беспилотной платформы (слева направо – монокорпус, катамаран, тримаран)

В настоящее время в мировой практике существует множество примеров применения жестких парусов. Одним из доказательств эффективности жесткого паруса может служить его применение на гоночных парусниках, которые имеют явное преимущество перед парусниками с традиционным парусным вооружением.



Рис. 2. Пример использования жестких парусов на международных гонках ORACLE RACING

На основании конструктивных особенностей жесткого паруса стоит отметить несколько важных деталей. Жесткий парус нельзя убрать или зарифить, что достаточно сильно ограничивает его применение на больших парусных яхтах и судах с парусными двигателями.

В многочисленных работах по исследованиям аэродинамического сопротивления доказано, что аэродинамическое сопротивление круглой мачты гораздо больше, чем жесткого паруса в положении флюгера при равных условиях.

Подобное низкое сопротивление аэродинамической формы жесткого паруса дает возможность применять его в штормовых условиях при определенных конструктивных решениях и соотношениях главных характеристик и размерений судна.

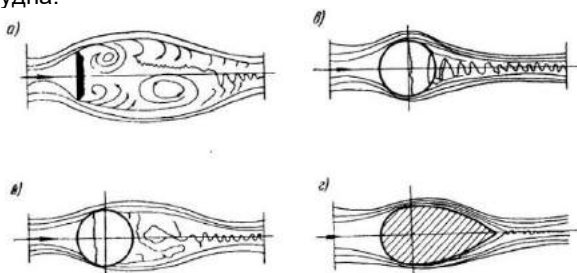


Рис. 3. Схема воздушного течения и сопротивления различных тел

На рисунке изображены условия обтекания разных тел с одинаковой площадью поперечного сечения. На рисунке 3а, в потоке стоит плоская пластина, аэродинамический коэффициент которой ориентировочно будет равен $C_x = 1,18$. На рисунке 3б происходит обтекание шара до образование устойчивого вихря за шаром с аэродинамическим коэффициентом $C_x = 0,47$ и 3в с образованием устойчивого вихря за шаром с коэффициентом $C_x = 0,08$. На рисунке 3г показано обтекание тела каплевидной формы (заявленной формы жесткого паруса крыла) аэродинамический коэффициент лобового сопротивления, которого является наименьшим и составляет ориентировочно $C_x = 0,04$.

Таким образом, подтверждается оправданность и эффективность применения каплевидных (симметричных) аэродинамических профилей для устройства жесткого паруса крыла. В качестве примера и доказательства эффективности использования жесткого паруса крыла можно привести фактически исследования на яхте OMER, где площадь паруса крыла была уменьшена по

отношению к стандартному парусному вооружению и составляла 85% [2].

Данный пример показывает, что при определенном подходе и дополнительных исследованиях применение подобных движителей целесообразно для морских автономных исследовательских безэкипажных судов.

1. Проектирование жесткого паруса крыла как конструктивного элемента ММБП

Несмотря на то, что разработка ветровых движителей (ВД) в мировой практике пришла на начало 70-х годов XX века, только сейчас технологии позволяют их применить на практике. Ярким примером могут служить разработки ученых из Университета прикладных наук Киль (Германия), Оклендский университет технологий (Новая Зеландия), Школа мехатроники и автоматизации Шанхайского университета (Китай), Эдинбургский университет (Шотландия), Корейский институт передовой науки и техники (Корея) и др.

Сообщества ученых различных стран пытаются как можно быстрее и ясно объяснить теорию и практику применения ветрового движителя (жесткого паруса) и свести к понятным методикам и численным методам. Для упрощения проектирования жесткого паруса применяют автоматизированные системы проектирования CAD/CAE/CAM, применение которых на начальной стадии позволяет обойтись без значительных затрат на эксперименты и провести цифровое моделирование процессов.

Для морской многоцелевой беспилотной платформы парус является основной движущей силой, поэтому повышение эффективности жесткого паруса является ключом к общей эффективности самой ММБП.

Первая задача проектирования на пути к эффективности сводится к определению аэродинамического профиля, из которого состоит жесткий парус. Методика выбора аэродинамических оптимальных профилей и сравнении их характеристик в первом приближении в автоматизированных системах проектирования при заданных условиях работы.

После выбора профиля рассматриваются величины действующих на него сил (подъемная сила, опрокидывающая сила, сила, приводящая в движение). Подобный подход позволяет определить минимальную скорость ветровой нагрузки, при которой ММБП будет управляема для выполнения поставленных задач. Это даёт полную картину работы ММБП в очень сложных ветровых условиях и наглядно демонстрирует широту диапазонов нормальной работы при маневрировании и преодолении препятствий.

Говоря о профиле, мы подразумеваем все семейство аэродинамических поверхностей из серий NACA, DU, FFA-W и RIS. Для сравнения берутся разные аэродинамические профили, тонкие и толстые. Тонкий профиль может привести к увеличению тяги, но распределение давления у него находится в узком диапазоне у передней кромки. В толстом аэродинамическом профиле подъемная сила меньше соответственно и тяга, однако давление распределено более равномерно.

На рисунке 4 приведен пример сравнения расчетных параметров, полученных в процессе испытания [3]. Как правило, расчет параметров производится при углах атаки от 0 до 25 градусов. На рисунке 4 видно, что расчетные и фактические данные коэффициента подъемной силы и коэффициента сопротивления совпадают примерно до угла атаки 11 градусов. После угла атаки свыше 11 градусов идет значительное расхождение между фактическими данными и расчетными. Аэродинамические и геометрические характеристики профилей приводятся в каталогах аэродинамических профилей. Данные получены на основании расчетных и экспериментальных исследований крыльев. В экспериментальных исследованиях профилей приняты прямоугольные крылья стандартного удлинения.

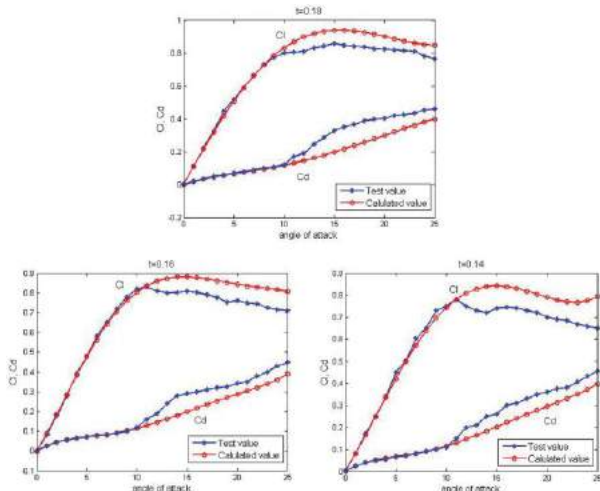


Рис. 4. Расчетные и испытательные значения аэродинамических профилей NASA разной относительной толщины (angle of attack – угол атаки, C_l – коэффициент подъемной силы, C_d – коэффициент сопротивления, красная линия – расчетные данные, синяя линия – данные испытаний)

Однако, эти данные необходимо приводить в соответствие к заданными геометрическими характеристиками и параметрами движения. Поэтому при расчете паруса крыла стоит задача определения геометрических характеристик, максимального коэффициента подъемной силы для заданных условий, зависимость коэффициента подъемной силы профиля от угла атаки, коэффициент лобового сопротивления и другие параметры, расчет которых обстоятельно изложен в литературе по авиационной и аэродинамике.

Понимая параметры корпуса и его весовые характеристики, можно определить минимально и максимально необходимую площадь и необходимые механические свойства поверхности жесткого паруса для обеспечения всех режимов работы в заданном интервале ветровых и волновых нагрузок для морской многоцелевой беспилотной платформы.

Необходимо отметить, что технологии с использованием жестких парусов на водном транспорте реализуются в различных масштабах, что представляет собой, как научный, так и чисто коммерческий интерес (проекты Oceanfoil, Skysails, Energysail) [4, 5, 6].

2. Энерговооруженность морской многоцелевой беспилотной платформы

Жесткий парус крыло по своей сути является универсальной конструкцией для получения возобновляемой энергии от солнца. Жесткий парус-крыло позволяет использовать не только силу ветра для движения платформы, но и солнечную энергию для обеспечения энергетической вооруженности платформы. Итак, мы говорим о жестком парусе-крыле как о самостоятельном объекте – энергетическом парусе.

Морская многоцелевая беспилотная платформа оснащена полугибкими высокоэффективными гетероструктурными солнечными элементами, размещенными на полезных поверхностях ММБП – на секциях жесткого паруса крыла (на стороне паруса 180 ячеек, размер одной ячейки 157x157 мм, мощность 5,5 Вт, масса – 10 гр.) и на корпусе платформы: монокорпусный вариант 44 ячейки, катамаран и тримаран – 122 ячейки [7].

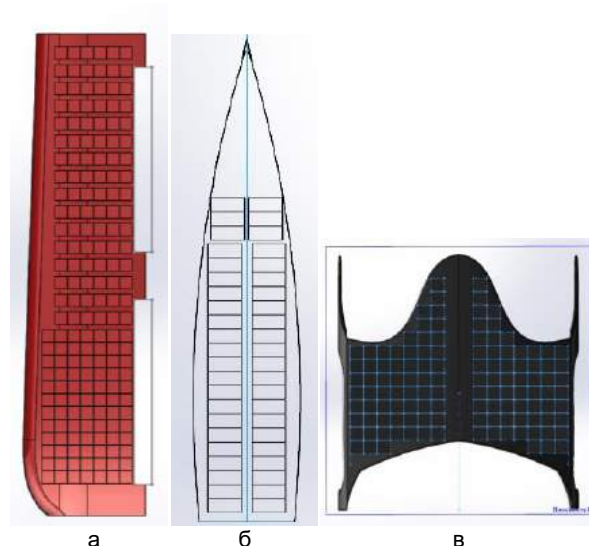


Рис. 5. Размещение полугибких высокоэффективных гетероструктурных солнечных элементов на ММБП (а – на конструкции жесткого-паруса крыла, б – на корпусе в варианте исполнения монокорпус, в – вариант исполнения катамаран и тримаран)

Таким образом, вырабатываемая мощность солнечных элементов составляет 2222 Вт для монокорпусного варианта ММБП, где 242 Вт от солнечных элементов, размещенных на корпусе и 1980 Вт от элементов, размещенных на жестком парусе-крыле. Общая масса солнечных элементов размещенных на варианте исполнения ММБП монокорпус составляет около 4 кг.

Для исполнения катамаран и тримаран мощность солнечных элементов составит 2651 Вт, где 671 Вт от солнечных элементов, размещенных на корпусе и 1980 Вт от элементов, размещенных на жестком парусе-крыле. Общая масса составит около 5 кг.

Кроме этого парус состоит из секций высотой 2-3 м, поэтому без изменений конструкции парус может быть использован во всех модификациях с возможностью наращивания дополнительной парусности и энерговооруженности. Таким образом, при необходимости увеличения

энерговооруженности имеется возможность увеличить её в пределах 20-30% (до 3,3 кВт).

Устройство управления парусом включает в себя набор серводвигателей с датчиками скорости вращения, тормозом и датчиками угла поворота вала. Серводвигатели обеспечивают управление движением ММБП вплоть до изменения направления движения на задний ход.

Для точного позиционирования морской многоцелевой беспилотной платформы используется система «азипод» с бесколлекторными электромоторами.

Функционал платформы позволяет производить сбор данных для последующей их обработки с целью проведения анализа окружающей среды в акватории, анализа рыбных запасов, океанологии и гидрографии, обследования акватории на наличии техногенных и взрывоопасных предметов и многое другое. Кроме штатного оборудования – дополнительное оборудование формируется в зависимости от потребностей заказчика.



Рис. 6. Описание функционала морской многоцелевой беспилотной платформы: 1 – измерение скорости ветра, его направления и температуры воздуха; 2 – пиранометр; 3 – цифровой барометр; 4 – высота волны и период; 5 – измерения магнитного поля; 6 – температура поверхности; 7 – анализаторы электролитов и газов.



Рис. 7. Описание функционала морской многоцелевой беспилотной платформы: 8 – измерение рыбной массы и батиметрия; 9 – датчик присутствия морских млекопитающих; 10 – определение солёности воды; 11 – замер растворенного кислорода; 12 – датчики мониторинга окружающей среды; 13 – измерения течений.

Базовое штатное оборудование ММБП: ультразвуковой датчик ветра – анемометр (потребляемая мощность от 8 до 42 Вт, вес – 1, 5 кг);

пиранометр – солнечное излучение (потребляемая мощность от 5 до 15 Вт, вес – 940 гр.); метеорологический зонд - измерение влажности и температуры воздуха (потребляемая мощность до 20 Вт, вес – 300 гр.); цифровой барометр (потребляемая мощность – до 16 Вт, вес – 110 гр.); датчики магнитного поля; акустический доплеровский измеритель течения; датчик растворенного кислорода; рН-Метр; система для мониторинга солености морской поверхности, скорости звука и плотности воды; акустические зонды; научный эхолот (потребляемая мощность до 30 Вт, вес до 1,5 кг); многолучевой сонар (потребляемая мощность до 85 Вт, вес – 11 кг); тактическая инерциальная навигационная система (потребляемая мощность 20 Вт, вес до 6 кг).

Итого общая потребляемая мощность исследовательского оборудования составляет 350 Вт, масса оборудования до 25 кг.

Рассмотрим систему управления движением морской многоцелевой беспилотной платформы для понимания минимальной энерговооруженности платформы.

Потребляемая мощность оборудования осуществляющего управление парусом и рулями (сервоприводы, контроллеры, бортовой компьютер, оборудование, обеспечивающее машинное зрение) составляет около 200 Вт. Масса до 30 кг.

В объеме комплекта для организации машинного зрения предусмотрено дублирование систем и дополнительно установка GPS, ГЛОНАСС модулей. Установка подобного оборудования и запись параметров обусловлена необходимостью соответствовать требованиям международных конвенций обеспечения безопасности мореплавания.

В качестве основного устройства для передачи пакетных данных используется спутниковое оборудование Iridium (потребляемая мощность 5 Вт в режиме передачи данных) и для обеспечения видения внешних целей необходим сонар (радар) с потребляемой мощностью до 150 Вт (отслеживает до 10 целей, дальностей действия до 3 миль).

Для обеспечения хранения энергии используются литий-ионные аккумуляторы модели LT-LFP 170 с номинальной емкостью 170 Ач (масса менее 7 кг) и LT-LFP 270 с номинальной емкостью 270 Ач (масса менее 10 кг) [8]. Необходимая емкость аккумуляторных батарей для хранения энергии ММБП составляет от 540 до 1080 Ач и зависит от варианта исполнения ММБП, установленного оборудования, а также района плавания. Масса блока аккумуляторных батарей составляет от 20 до 40 кг.

Если учесть фактор обеспечения только безопасности мореплавания ММБП, то при 100% заряде аккумуляторных батарей (потребляемая мощность оборудования 200 Вт), тогда автономность работы ММБП (при условии, что отсутствует внешний источник энергии) составит при емкости в 1080 Ач – 44 часа и 540 Ач – 22 часа.

Этого периода времени достаточно для обеспечения выхода платформы из зоны отсутствия солнечного излучения, учитывая наличие метеорологических данных. Также нужно отметить, что заложенные параметры в ММБП по потребляемой мощности также оправданы, в связи с

наличием сведений по проекту «Saildrone» (США) в 170 Вт.

Заключение

Использование альтернативной силовой установки – энергетического паруса, спроектированного на основе жесткого паруса крыла при реализации проекта ММБП позволяет достичь заданных тактико-технических характеристик.

Заложенное в проекте оборудование и устройства суммарно потребляют до 1 кВт. При этом возможности по энергетической мощности в зависимости от модификации колеблется от 2,2 до 2,6 кВт с потенциалом увеличения до 3,3 кВт. Заложенный запас по энергетике снимает все риски по устойчивому энергообеспечению платформы в течение 12 месяцев.

Масса платформы с оборудованием составляет около 190 кг, что также снимает риск правового регулирования. Так как в соответствии с Кодексом торгового мореплавания Российской Федерации не подлежат государственной регистрации суда массой до 200 кг включительно и мощностью двигателей (в случае установки) до 8 кВт включительно.

Учитывая, что интенсивность солнечного излучения зависит от географии использования ММБП (районов плавания), фактических погодных условий (изменение солнечного сияния в течение года), а также суточным изменением солнечной активности автономность работы ММБП по

энергообеспечению составляет в зависимости от модификации от 22 до 44 часов. При этом платформа движется непрерывно за счет использования силы ветра.

Энергетическое парус-крыло ММБП значительным образом повышает энергоэффективность и расширяет её функциональные возможности. Авторами проекта получен патент №184588 «Безэкипажное парусное судно» [1].

Кроме этого в рамках работы Каспийского распределенного центра «Маринет» авторы статьи приняли участие в экспедиции «Эковолна 2018», в которой удалось провести исследования, по фактически выполненным техническим решениям по проекту катамарана «Эковолна» с использованием оборудования от компаний «Лиотех», «МикроАрт» и «Хевел».

В перспективе для большего повышения уровня энергообеспеченности ММБП целесообразно рассмотреть возможность использования топливных элементов. Так в мире существует проект «Energy Observer» с использованием в качестве движителя электрического двигателя на основе возобновляемых источников энергии и системы производства водорода (технология топливных элементов) [9]. Это является перспективным направлением проработки технических решений в рамках проектирования автономных надводных исследовательских безэкипажных судов.

Литература

1. Пат. 184588 Российская Федерация, МПК В63Н 9/00 / Безэкипажное парусное судно. А.В. Титов, А.В. Павлов, В.А. Чанчиков; заявитель и патентообладатель А.В. Титов. – заявл. 31.05.2018; опубл. 31.10.2018. Бюл. №31. – 3 с.
2. Электронный ресурс URL: <http://www.omerwingsail.com/>
3. Shaorong Xie, Jiqing Chen, Hengyu Li, Jun Luo, Huayan Pu, Yan Peng The research on wing sail of a land-yacht robot. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 7(12), pp. 1-19.
4. Электронный ресурс URL: <http://oceanfoil.com/>
5. Электронный ресурс URL: <https://www.skysails.info/>
6. Электронный ресурс URL: <http://www.ecomarinepower.com>
7. Электронный ресурс URL: <http://www.hevelsolar.com/products/>
8. Электронный ресурс URL: <http://www.liotech.ru/newsection7159>
9. Электронный ресурс URL: <http://www.energy-observer.org>

References

1. Pat. 184588 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B63H 9/00. Bezkipazhnoe parusnoe sudnoy. A.V. Titov, A.V. Pavlov, V.A. Chanchikov; zayavitel' i patentoobladatel' A.V. Titov. Zayavl. 31.05.2018; opubl. 31.10.2018. Byul. №31. 3 p.
2. Elektronnyy resurs URL: <http://www.omerwingsail.com/>
3. Shaorong Xie, Jiqing Chen, Hengyu Li, Jun Luo, Huayan Pu, Yan Peng The research on wing sail of a land-yacht robot. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 7(12), pp. 1-19.
4. Elektronnyy resurs URL: <http://oceanfoil.com/>
5. Elektronnyy resurs URL: <https://www.skysails.info/>
6. Elektronnyy resurs URL: <http://www.ecomarinepower.com>
7. Elektronnyy resurs URL: <http://www.hevelsolar.com/products/>
8. Elektronnyy resurs URL: <http://www.liotech.ru/newsection7159>
9. Elektronnyy resurs URL: <http://www.energy-observer.org>