

# ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДОКОВЫХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ АНПА

**В.В. Княжев, В.В. Лощенков**

Зарядные доковые станции используют для обеспечения длительного автономного функционирования автономных подводных обитаемых аппаратов (АНПА) без необходимости возвращения в порт или подъема к судну сопровождения. На доковых станциях производится зарядка бортовых аккумуляторных батарей АНПА, обмен информацией и ее хранение. Зарядные доковые станции должны иметь источники энергии, способные поставлять энергию неограниченное время или с периодической, но достаточно редкой заправкой. Рассмотрено энергоснабжение зарядных доковых станций по кабельным линиям, от ядерных источников энергии, водородных топливных элементов и возобновляемых источников энергии, таких как ветровая, волновая, солнечная энергии, энергия течений, тепловая энергия слоев воды с разной температурой, энергия градиентов солёности. Запасы энергии на зарядной доковой станции при использовании батареи водородных топливных элементов зависят от емкости системы хранения реагентов. Сделаны оценки параметров системы с производимыми в России батареями топливных элементов и газовыми баллонами высокого давления. Определены энергия и мощность зарядной станции, требующиеся для многократной зарядки разработанных в ИПМТ ДВО РАН аппаратов МТ-2010 и МТ-2013.

**Ключевые слова:** зарядная доковая станция, АНПА, источники энергии, возобновляемые источники энергии, ядерные, водородные топливные элементы.

## Введение

Автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) интенсивно совершенствуются и широко используются в гражданской и военной сферах, для исследования океана, обследовании и обслуживания водных объектов. Проблему обеспечения энергией при длительном автономном функционировании АНПА без необходимости постоянного возвращения к судну носителю или в порт решают за счет экономии энергии, использования возобновляемых источников окружающей среды, установки на аппарат источников энергии большой емкости, например, ядерных, литий-ионных батарей или топливных элементов. При установке источника энергии в АНПА есть ограничения по габаритам и массе, а следовательно, и по энергетическим запасам, есть проблемы изменения плавучести и дифферента аппарата по мере расходования реагентов. Доковые зарядные станции, установленные на дне, в толще воды или на поверхности моря, от которых АНПА периодически может подзарядиться, позволяют продлить время автономного функционирования аппарата.

Доковые станции, как правило, не ограничены по объему и массе, проблемы плавучести для них не важны, так как они не перемещаются свободно в толще воды, если это не мобильные зарядные станции. Для зарядки батарей АНПА разрабатывается и используется беспроводная индукционная передача энергии от доковой станции к аппарату. Кроме того, на доковые станции может производиться обмен информацией, выгрузка данных, полученных АНПА, хранение и передача. Возможно использование доковых зарядных станций для безопасной стоянки аппаратов в промежутки времени между выполнением миссий.

## ■ Стыковочные станции

Для стыковки АНПА с зарядной доковой станцией применяют четыре варианта конструкции стыковочных станций: однонаправленная (воронкообразная), всенаправленная, посадочная платформа и стыковочная станция с захватами [1, 2].

Однонаправленная стыковочная станция наиболее широко применяется для аппаратов, похожих

по форме на торпеду, она имеет конусообразный вход для большего поперечного сечения. АНПА, попав в воронку, направляется к узлу стыковки и зарядки. Такую стыковочную станцию применяли для АНПА REMUS [3]. Стыковочную станцию этой конструкции применяют для зарядных доковых станций, установленных на дне [4]. В зарядной станции «Октавис», разрабатываемой АО «ЦКБ «Рубин»», предполагаются две стыковочные станции подобной конструкции [5].

«Всенаправленная» стыковочная станция обычно выполнена в виде вертикальной конструкции из жесткого стержня или натянутого троса. АНПА может к ней подходить с любого направления и соединиться со стержнем или тросом с помощью защелки, установленной в передней части аппарата. Недостатком такой конструкции может быть то, что такая защелка будет мешать установке аппаратуры в передней части аппарата [6, 7].

Стыковка АНПА с зарядной платформой подобна посадке летательного аппарата на палубу корабля. При этом АНПА может подходить к зарядной доковой станции с любого направления, и ограничений на форму аппарата меньше [1, 4]. Международная энергетическая компания «Equinor» (Норвегия) разрабатывает доковые зарядные станции такой конструкции [8, 9]. Предлагается спуск и установка зарядной доковой станции на постоянное место на морском дне с помощью крана с грузового судна. Док-станция представляет собой плоскую конструкцию размером 2,586 x 2,856 м, которая опирается на направляющие столбы. Но в зависимости от состояния грунта её можно установить на грязевой мат или закрепить с помощью вакуумных якорей [10].

В системе стыковки «с захватами» АНПА плотно притягивают к зарядной доковой станции специальными захватами [11].

## ■ Источники энергии доковых зарядных станций АНПА

Система энергоснабжения и источники энергии для длительной автономной работы АНПА и зарядных доковых станций АНПА представлены на рис. 1. Источниками энергии служат возобновляемые источники, ядерные источники и батареи топливных элементов, установленные на зарядной доковой станции

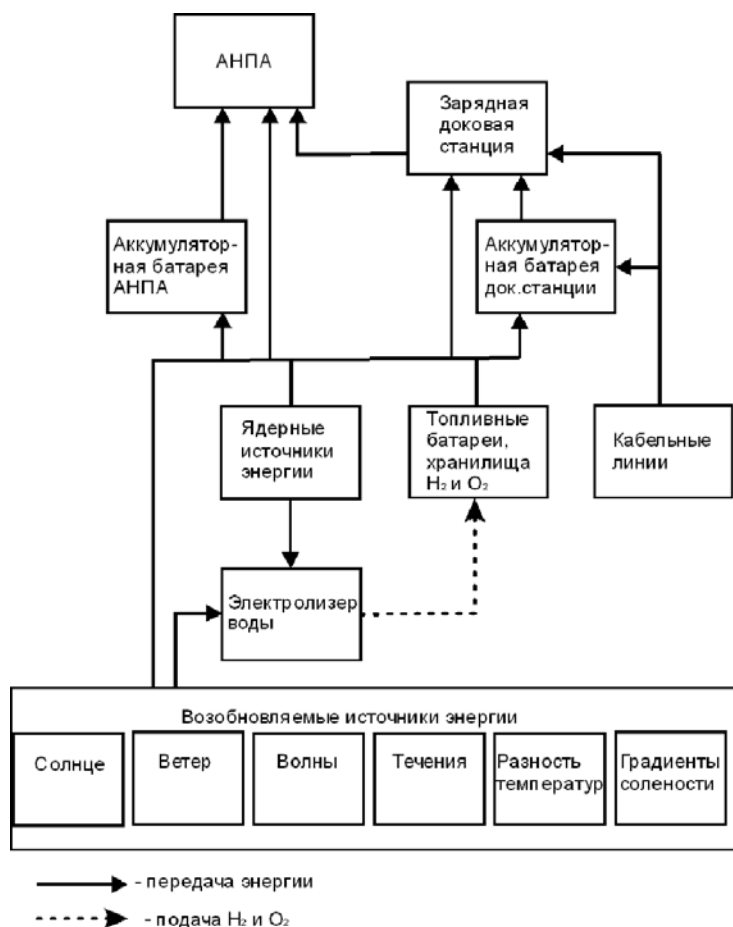


Рис. 1. Структура системы автономного энергоснабжения АНПА и зарядной доковой станции

или непосредственно на АНПА. Электроэнергия может подаваться для зарядки аккумуляторных батарей АНПА и доковой станции, а также использоваться прямо для питания двигательной и приборных систем аппарата. Для передвижения аппарата могут использоваться и другие формы энергии от этих источников, а не только электроэнергия.

Накопление и сохранение энергии от возобновляемых и ядерных источников может осуществляться при электролизе воды и получении водорода и кислорода. При преобразовании энергии градиентов солености возможно производство водорода и кислорода в электролизной батарее непосредственно в процессе преобразования энергии.

Энергообеспечение зарядных доковых станций возможно по кабельным линиям от внешних источников.

### Кабельные сети

В прибрежных районах Мирового океана в настоящее время создаются кабельные сети, соединяющие донные станции для исследования океана, контроля над сейсмической активностью, рыбными ресурсами, военными объектами и пр. По кабелям осуществляется подача энергии на донные станции и осуществляется передача информации [12].

В 2012 году в США была развёрнута кабельная сеть с приборами наблюдения на морском дне протяжённостью почти 900 км [13]. Подобные кабельные сети планируется использовать для питания электроэнергией доковых зарядных станций АНПА и информационной связи.

Компания «Equinor» планирует использовать АНПА для обследования и контроля нефтяных платформ и подводных нефтепромыслов, для этого на дне размещены зарядные доковые станции, соединённые кабельной сетью с нефтяными платформами, на которые передаётся информация и с которых производится подача по кабелям электроэнергии на зарядные доковые станции. Благодаря зарядке и обмену информацией на док-станциях АНПА продолжительное время функционируют без подъёма на поверхность [10].

Питание энергией с берега по силовому кабелю планируется и для многофункциональной донной станции поиска и мониторинга подводных нефтегазовых месторождений, разрабатываемой предприятием «Океанос» и Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом [14]. Станция является модульной и может комплектоваться под разные цели. В базовом варианте станция оснащена датчиками для мониторинга окружающей среды и специальными разъёмами для подключения АНПА.

Недостатком удалённых зарядных доковых станций с кабельной системой питания являются большие расходы на прокладку кабелей и невозможность быстрого перебазирования. Компания «Equinor» планирует перейти на энергоснабжение зарядных доковых станций от возобновляемых источников энергии [10]. В проекте подводной станции «Октавис» от АО «ЦКБ «Рубин» также декларируется использование возобновляемых источников энергии [5].

### **Возобновляемые источники энергии**

Использование местных возобновляемых источников энергии для энергоснабжения зарядных доковых станций позволяет отказаться от дорогостоящих кабельных линий и размещать док-станции вдали от электрических сетей и берега. Исключается необходимость поставки топлива на док-станции. От возобновляемых источников энергии заряжаются аккумуляторы зарядной доковой станции и аккумуляторы АНПА.

На поверхности моря возможно использование ветровой, волновой и солнечной энергии. Доковая зарядная станция находится на поверхности или под водой, и энергия передаётся на нее по кабелю от электростанции. Электростанции, использующие

разность температур между слоями воды и энергию приливных и океанских течений, устанавливаются под водой. Изменение давления при прохождении приливных и ветровых волн также используются для выработки энергии на подводных установках.

Компания «Maersk Supply Service» (Дания) в 2022 году запустила проект Stillstrom по зарядке морских судов. Она планировала совместно с ветроэнергетической компанией «Ørsted» продемонстрировать первую в мире полномасштабную морскую зарядную станцию для электрических судов с питанием от морской ветряной электростанции [15]. Подобный зарядный буй может заряжать и АНПА.

В большинстве проектов морских доковых станций используется преобразование энергии волн, так как волнение присутствует в открытом море большую часть времени. В работе [16] выполнена теоретическая оценка энергетических возможностей плавающего точечного преобразователя волновой энергии, схема его и размеры приведены на рис. 2. Энергия производится при взаимном движении поплавок относительно колонны с подводным якорем вследствие изменения уровня воды при прохождении волны. Преобразователь волновой энергии пришвартовывался между тремя стоящими на якорю буями, распределёнными вокруг него с угловым расстоянием 120°. Анализировалось три варианта размещения стыковочных узлов зарядной доковой станции: на морском дне, на отдельном плавучем корпусе и непосредственно на прикреплённом ко дну преобразователе. При высоте волн от 1 до 6,7 м средняя выходная мощность составила от 320 до 2800 Вт. В кабеле, соединяющем преобразователь энергии с зарядной доковой станцией, были потери энергии. Наиболее длинный кабель нужен для подключения стыковочного узла на дне, а самый короткий – для стыковочного узла на дне волнового преобразователя. Длинный кабель, кроме того, влияет на колебания волнового преобразователя.

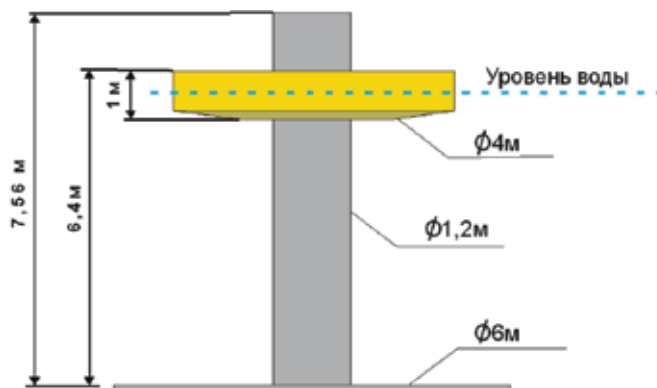


Рис. 2. Точечный преобразователь волновой энергии

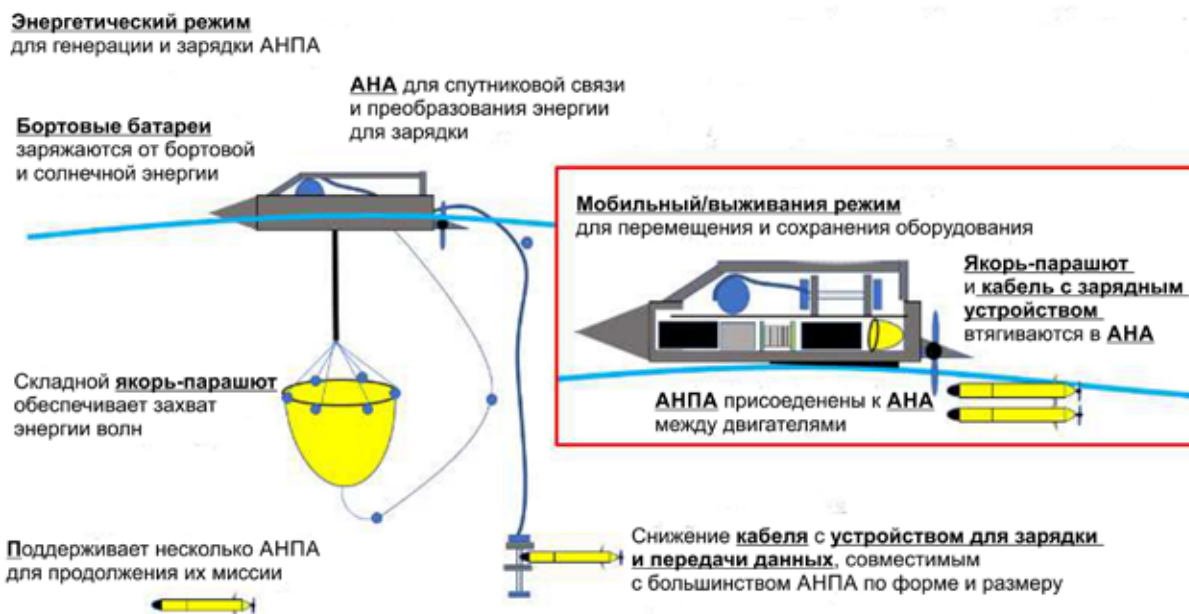


Рис. 3. Автономный надводный аппарат (АНА) для преобразования энергии волн и зарядки АНПА

Моделирование процесса стыковки АНПА со стыковочными станциями показало возможность успешной стыковки со стыковочным узлом на морском дне, стыковка со стыковочным узлом на отдельном плавучем корпусе тоже успешна, за исключением волнения с самой большой амплитудой, а стыковка со стыковочным узлом на дне преобразователя была неудачной из-за его колебания при всех состояниях моря, кроме волн с самой малой амплитудой.

В Калифорнийском университете в Беркли предложили проект мобильной зарядной доковой станции, использующей энергию волн и солнца [17]. Автономный надводный аппарат (АНА) в виде катамарана совмещен с преобразователем волновой энергии (рис. 3). Для преобразования энергии волн используется движение корпуса АНА относительно подводного плавучего якоря. Якорь, выполненный в виде складывающегося парашюта, натягивает шнур. Он сматывается с подпружиненной катушки и вращает ее и электрогенератор, происходит зарядка бортовых литий-ионных аккумуляторов. Ёмкость аккумуляторной батареи примерно 20 кВт·ч, что достаточно для приведения в движение АНА и зарядки АНПА. Дополнительно энергия для зарядки аккумуляторной батареи, когда волнение моря слабое, поступает от солнечных батарей, установленных сверху АНА. Информация, полученная от АНПА, передается с АНА по спутниковой связи. Стыковочная станция опускается на кабель-тросе под воду лебедкой. К ней пристыковываются АНПА для зарядки своих аккумуляторных батарей и передачи данных. В транспорт-

ном положении лебедками сматываются шнур с якорем-парашютом и кабель со стыковочной станцией. АНПА присоединяются между корпусами катамарана около двигательной установки.

Авторами разработана морская волновая энергетическая установка с плавучим подводным якорем, выполненная с возможностью ее трансформирования в два установочных функциональных состояния: в рабочее состояние генерации, когда установка вырабатывает электроэнергию из потенциальной и кинетической энергии поверхностных волн, и в транспортное состояние в виде АНПА для транспортировки и передачи выработанной электроэнергии прибрежным, подводным и надводным потребителям, в том числе в движении. Энергия на борту установки хранится в металлгидридных аккумуляторах водорода и кислорода. При необходимости электроэнергия производится топливными элементами для двигательной установки и зарядке электроаккумуляторов. На проект этой установки получен патент на полезную модель [18].

В работе сотрудников Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [19] предложено обеспечение энергией подводной зарядной доковой станции от поплавковой волновой электростанции с генераторами линейного типа и с генератором вращательного типа. Кроме того, предложено использовать энергию морского потока с помощью турбины и электрогенератора в капсуле с положительной плавучестью, соединенной ка-

бель-тросом с зарядной донной доковой станцией. Такая станция может устанавливаться в местах, где скорость течения достаточна для эффективной зарядки.

Электростанции, использующие энергию океанских и приливных течений для энергоснабжения зарядных доковых станций, позволяют размещать их под водой [14]. Но сильные приливные течения есть обычно во внутренних водах в узких проливах, где не требуется длительный мониторинг с помощью АНПА. Океанские течения в некоторых регионах могут иметь значительные скорости. Однако эксплуатация АНПА в условиях быстрых океанских течений достаточно сложна.

Скрытно под водой могут постоянно находиться и зарядные доковые станции, в которых электроэнергия вырабатывается с использованием разности температур между теплыми поверхностными водами и холодными глубинными [20]. Материал с фазовым переходом, такой как парафин – пентадекан, плавится при температуре верхних слоев океана, расширяясь при этом, и замерзает, сжимается при температуре на глубине. Трубки с парафином помещаются в контейнер, заполненный гидравлическим маслом. При плавлении парафин расширяется и выталкивает масло в сосуд с высоким давлением, примерно 20,7 Мпа. На глубине клапан сосуда открывается и масло под высоким давлением проходит через гидравлический двигатель и сбрасывается в контейнер с трубками с замерзшим парафином. Гидравлический двигатель вращает генератор для выработки энергии и зарядки аккумуляторов. Часть электроэнергии расходуется для изменения плавучести за счет внешних гибких резервуаров или на подъем станции двигателем на тросе. Масло после гидравлического двигателя может прямо подаваться во внешний гибкий резервуар и повышать плавучесть аппарата. Так не нужно тратить электроэнергию на закачивание масла в этот резервуар насосом. Верхнее положение станции задается на достаточном удалении от поверхности океана, чтобы она не могла быть повреждена штормом или проходящим судном.

В прибрежной зоне около устьев рек, где есть пресная вода, или на дне океана, в местах, где под дном имеются залежи твердой соли или рассолы, можно использовать энергию градиентов солености при смешении растворов разной концентрации. При прямом преобразовании энергии градиентов солености обратным электродиализом в электроэнергию есть возможность производить водород и кислород при электролизе на электродах электродиализной батареи.

### *Ядерные источники энергии*

Донные станции, в том числе и зарядные донные станции, могут длительное время без дозаправки снабжать энергией компактные ядерные реакторные установки, они могут работать как замкнутые системы. В японском Институте развития ядерного цикла (Cycle Development Institute, Tsuruga, Fukui) была предложена атомная электростанция, состоящая из системы жидкостного металлического реактора на быстрых нейтронах и системы выработки электроэнергии по замкнутому циклу Брайтона. Установка имеет следующие характеристики: тепловая мощность 215 кВт, электрическая мощность 40 кВт, первичный теплоноситель NaK (Na: 0,22, K: 0,78), вторичный теплоноситель — смесь газов гелия и ксенона, общий вес 26600 кг, высота 5,2 м, глубина установки 3500 м [21]. Электростанция предназначалась для обеспечения энергией донной станции для исследования океана.

В ЦКБ МТ «Рубин» разработан проект подводного энергетического комплекса с ядерным реактором для энергообеспечения автономного подводного (подледного) освоения месторождений углеводородов в арктических морях в тяжелых ледовых условиях [22]. Энергетический комплекс с ядерной установкой (проект «Айсберг») имеет следующие характеристики: ресурс установки – 200 тыс. часов, срок службы – 30 лет, мощность – 24 МВт, период автономной непрерывной работы – 8 000 часов. Электрические станции с ядерным реактором имеют то преимущество, что являются долговременным стабильным мощным источником энергии, но при этом их конструкция достаточно сложна, они имеют большой вес и размер. Есть опасность утечки радиоактивных материалов при повреждении корпуса реактора.

В радиоизотопном термоэлектрическом генераторе (РИТЭГ) тепло, выделяющееся при естественном распаде радиоактивных элементов, преобразуется в электроэнергию с помощью термоэлементов. Конструкция такого генератора значительно проще электростанций с ядерными реакторами, не имеет движущихся частей и является более компактной. РИТЭГ не требует постоянного обслуживания. Значительный объем и вес этого генератора составляет радиационная защита. Но термоэлементы имеют низкий КПД преобразования тепловой энергии в электроэнергию, и мощность РИТЭГ не велика. РИТЭГ используются как источники энергии небольшой мощности там, где необходимо автономное долговременное энергоснабжение. Они производятся для использования на космических аппаратах, в удаленных труднодоступных местах на суше и на море. Основные технические характеристики некоторых произведенных

Таблица 1. Основные технические характеристики некоторых наземных РИТЭГ

Тип РИТЭГ, страна	Мощность, Вт	Напряжение, В	Ресурс, лет	КПД, %	Удельная мощность, Вт/кг	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
Глория-60, Россия	60	7, 14, 28	10 (20)	8,1	0,152	460	Ø650×1200
Глория-80, Россия	80	7, 14, 28	10 (20)	8,2	0,147	800	Ø850×1000
Глория-120, Россия	120	7, 14, 28	10 (20)	8,4	0,19	850	Ø850×1230
BUP-500, США	610	28	5.5	8,5	0,18	3300	Ø1392×1392

Таблица 2. Основные технические характеристики РИТЭГ производства США для морского применения

Тип РИТЭГ	Радионуклид	Мощность, Вт	Напряжение, В	Ресурс, лет	КПД, %	Удельная мощность, Вт/кг	Масса, кг	Глубина погружения, м	Назначение
SNAP-7A, SNAP-7C	<sup>90</sup> Sr	11,6	5	10	4,5	0,014	850	0	Навигационный буй
SNAP-7B, SNAP-7D	SrTiO <sub>3</sub>	6,8	12	10	4,7	0,033	2090	0	Маяк
SNAP-7E	<sup>90</sup> Sr	6,5	3,5	5	3,3	0,0064	1020	6850	Подводный буй
SNAP-21	<sup>90</sup> Sr	14	4,5	5	6,9	0,064	227	7000	Подводный буй
SNAP-23	<sup>90</sup> Sr	88	28	10	7,1	0,19	450	7000	Подводный буй

в России и США наземных РИТЭГ (в них использовался радионуклид <sup>90</sup>Sr), приведены в табл. 1, основные технические характеристики РИТЭГ для морского применения производства США приведены в табл. 2 [23].

РИТЭГ вырабатывает электроэнергию постоянно, она может накапливаться и сохраняться в аккумуляторной батарее зарядной доковой станции и заряжать аккумуляторы АНПА при стыковке с зарядной доковой станцией. В случае недостаточного количества энергии, производимой одним РИТЭГ, потребуется установка нескольких генераторов на зарядной доковой станции. Основными недостатками РИТЭГ являются проблемы утилизации радиоактивных материалов после окончания их срока службы и опасность утечки радиоактивных материалов в окружающую среду при аварийных ситуациях.

### Водородные топливные элементы

Водородные топливные элементы предоставляют возможность долговременно обеспечивать энергией зарядные доковые станции между периодическими зарядками реагентами. В компании «Teledyne Energy Systems» (США) разработали подводную зарядную станцию с водородными топливными элементами, каждый блок элементов выдает 8 кВт мощности. Кислород и водород хранятся в газовых баллонах. Газы по-

даются через блок подачи реагентов с эжекторным приводом, что устраняет необходимость в механическом насосе. Первая версия системы может накапливать 100 кВт·ч энергии, следующая версия способна накапливать 600 кВт·ч энергии [24].

Система была продемонстрирована на военно-морских учениях ANTX 2018 на глубине 43 метра в доке Род-Айленда, где она приводила в действие дистанционно управляемый аппарат, выполняющий осмотр корпусов судов.

В Норвегии компания «Teledyne» провела испытания своей подводной зарядной станции в Норвежском центре обучения работе на шельфе, в автономном центре Тау, на объекте для подводных испытаний недалеко от Ставангера в Норвегии на



Рис. 4. Подводная зарядная станция Teledyne с подводным гидравлическим насосным агрегатом, разработанным Innova

глубине 235 м. В ходе испытаний система использовалась для питания подводной гидравлической насосной установки, разработанной компанией Innova (рис. 4) [25]. Представители Teledyne утверждают, что система может быть настроена на выработку более 3 МВт·ч энергии, обеспечивать стабильную мощность до 8 кВт и устанавливаться на глубине до 1000 метров.

В Киле (ФРГ) под руководством Центра океанических исследований им. Гельмгольца GEOMAR была разработана подводная система с топливными элементами для мобильных систем наблюдения в океане (рис. 5) [26]. Она состоит из 11 баллонов с водородом, пяти баллонов с кислородом и топливного элемента с протонообменной мембраной, разработанного Центром исследований солнечной энергии и водорода в Ульме (ZSW) [26]. Запас энергии в системе 120 кВт·ч и максимальная выходная мощность в 1 кВт. Кроме того, в системе есть аккумуляторная батарея мощностью 4 кВт, заряжающаяся от топливного элемента. По словам руководителя проекта доктора Флэгеля, для выработки такого же количества энергии (используя первичные элементы) понадобилось бы около 13 200 аккумуляторных элементов, а один заряд обошёлся бы примерно в 20 000 евро. Для сравнения: заправка топливного элемента, разработанного GEOMAR, стоит 1250 евро. Система рассчитана на глубину до 1200 м, однако планируется увеличить глубину до 3000 м. В ноябре 2021 года в Балтийском море было проведено 48-часовое испытание в сотрудничестве с 71-м подразделением службы оборонных технологий сухопутных войск Германии в Эккернфёрде.



Рис. 5. Вид внутри контейнера топливных элементов, разработанных GEOMAR.

## ■ Система хранения реагентов для топливных элементов в газовых баллонах

Хранение реагентов для топливных элементов в газовых баллонах под давлением является наиболее простым и широко распространенным, несмотря на то что объемная плотность хранения реагентов при этом самая низкая среди других способов хранения реагентов [27]. В Центре технологических компетенций «Полимерные композиционные материалы» ООО «НПО „Центротех“» (Новоуральск, Свердловской области) разработали, изготовили и успешно испытали опытные образцы металлокомпозитных баллонов различного объема для хранения и транспортировки водорода с рабочим давлением 700 атмосфер (68,9 МПа). Лейнер (внутренний герметизирующий слой баллона) изготовлен из алюминиевого сплава, а упрочняющая обмотка баллона выполнена с использованием углеродного волокна. По результатам испытаний опытный образец металлокомпозитного баллона объемом 50 литров продемонстрировал требуемый запас прочности (выдержал предельные нагрузки с коэффициентом запаса 2,4) [28]. Выполним оценку, сколько таких баллонов высокого давления с водородом и кислородом потребуется для зарядной доковой станции с топливными элементами, произведенными в России.

Компания HydrogenEnergy выпускает электрохимические генераторы HG30W мощностью 30 кВт на основе топливных элементов с протонообменной мембраной, предназначенные для выработки постоянного тока. Номинальный расход водорода 440 л/мин в нормальных условиях. В генераторе используется кислород из окружающего воздуха, но он, в принципе, может быть переоборудован для питания чистым кислородом [29].

В филиале ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» занимаются разработкой и созданием батарей топливных элементов для надводных и подводных транспортных средств. Батарея БТЭ-50 при работе на кислороде и водороде имеет номинальную мощность 50 кВт, КПД при номинальной нагрузке 60 % [30].

Оценим расход водорода для батареи БТЭ-50, исходя из того, что удельная теплота сгорания водорода составляет примерно 140 МДж/кг.

Таблицы 2. Характеристики системы энергообеспечения АНПА и расчетные энергия и мощность, требующиеся для зарядки

АНПА	Аккумулятор	Количество аккумуляторов	Количество элементов в аккумуляторе	Номинал. емкость, А·ч	Номинальное напряжение элемента, В	Заряд АНПА, кВт·ч	Максимальная мощность при зарядке, Вт
МТ-2010	PL-1055275-2С	3	2x7	18	3.7	2.7972	441
МТ-2013	ЛИКГП-150С	2	12	150	3.6	12.96	2016

Объем одного килограмма водорода можно вычислить по формуле:  $V = V_m m / M$ , где  $V_m$  – молярный объем, который для всех газов при нормальных условиях равен 22,4 л/моль,  $m$  – масса водорода,  $M$  – молярная масса, 2 г/моль. Объем одного килограмма водорода получается равным 11200 л. Удельная объемная теплота сгорания водорода 140000 кДж/кг/11200 л/кг = 12,5 кДж/л. Так как КПД батареи равен 60%, то она будет производить 12,5 кДж/л·0,6=7,5 кДж/л. Расход водорода будет (50 кВт/7,5кДж/л) ·60 с = 400 л/мин. Большой расход водорода при меньшей мощности для генератора НГ30W объясняется, наверное, тем, что его КПД указывается равным 40%, причиной чего может быть использование кислорода из воздуха.

Объем газа, хранящегося при нормальных условиях в баллоне объемом 50 л при давлении 700 атмосфер (68,9 МПа), можно пересчитать по закону Бойля–Мариотта:  $V = V_{700} P_{700} / P$ , где  $V_{700}$  и  $P_{700}$  – объем, и давление газа в баллоне,  $P$  – атмосферное давление. Получается, что при нормальных условиях объем водорода, хранящегося в баллоне, равен  $50 \cdot 700 / 1 = 35000$  л. Этого объема водорода достаточно для выработки на БТЭ-50 7,5 кДж/л·35000 л = 262500 кДж = 73 кВт·ч энергии. По стехиометрическому соотношению потребуется в два раза меньший объем кислорода.

Выполним оценку потребностей в энергии для зарядки разработанных в ИПМТ ДВО РАН аппаратов МТ-2010 и МТ-2013. В АНПА МТ-2010 использованы элементы PL-1055275-2С производства AA Portable Power Corp (США), в АНПА МТ-2013 установлены элементы ЛИКГП-150С производства ОАО «Ригель» [31]. Характеристики системы энергообеспечения этих АНПА [31–33] и расчетные энергия и мощность, требующиеся для их зарядки, приведены в табл. 2.

Можно посчитать, что доковая зарядная станция с батареями топливных элементов БТА-50 и системой хранения реагентов из десяти баллонов с водородом и пяти баллонов с кислородом при давлении 700 атм. может обеспечить зарядку АНПА МТ-2010 261 раз, а АНПА МТ-2013 – 56 раз. В реальности из-за потерь в процессе зарядки цифры будут меньше. Мощность такой батареи явно избыточна. От нее может заряжаться целая группа аппаратов. Для зарядки этих аппаратов достаточно использовать батареи топливных элементов меньшей мощности, тем более, что избыток энергии, вырабатываемой батареями топливных элементов, может накапливаться и храниться в батарее литий-ионных элементов на зарядной доковой станции. Эта накопленная энергия может повышать мощность системы зарядки доковой станции.

Замена баллонов с израсходованными газами на донной зарядной доковой станции может производиться во всплывающем блоке с баллонами, чтобы не поднимать всю станцию.

## Заключение

Разные источники энергоснабжения донных зарядных доковых станций имеют свои преимущества и недостатки. Выбор источника энергии зависит от конкретных условий и места расположения станций и конкретных задач для нее и автономных необитаемых подводных аппаратов. Наиболее критична зависимость как от постоянных, так и меняющихся местных условий использование возобновляемых источников энергии. Для сглаживания колебаний выработки энергии необходимы аккумуляторные батареи. Питание доковых станций от батарей топливных элементов более стабильно и мало зависит от местных условий. Но необходимо периодическое восполнение запаса реагентов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Jin L., Cui W. On technical issues for underwater charging of robotic fish schools using ocean renewable energy// Ships and Offshore Structures Published online: 10 Aug 2023. URL: [https://iuchao-jin.github.io/files/my\\_essay/jin2023technical.pdf](https://iuchao-jin.github.io/files/my_essay/jin2023technical.pdf) (дата обращения: 26.11.2025).
- Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А., Квашнин А.Г. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. 2011. №1 (54). С. 13–21. URL: <https://pstmprint.ru/wp-content/uploads/2016/04/dt-1-2011-3.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).

3. Stokey R., Allen B., Austin T., Goldsborough R., Forrester N., Purcell M. Enabling technologies for REMUS docking: an integral component of an autonomous ocean-sampling network // IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 26. Issue: 4. October 2001. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/972082> (дата обращения: 09.07.2025).
4. Underwater Vehicle Charging: Autonomous Underwater Vehicles, Unmanned Underwater Vehicles, and Remotely Operated Vehicles p.23-37 // Powering the Blue Economy™: Exploring Opportunities for Marine Renewable Energy in Maritime Markets. Water Power Technologies Office. Marine Energy Program. April 2019. P. 23–37. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/09/f66/73355-v2.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).
5. Необитаемая подводная станция «Октавис» представлена на выставке «Армия-2024» 12.08.2024. АО «ЦКБ «Рубин» URL: [https://ckb-rubin.ru/mediacentr/novosti\\_i\\_sobytiya/novost/news/detail/News/neobitaemaja\\_podvodnaja\\_stancija\\_oktavis\\_predstavlena/](https://ckb-rubin.ru/mediacentr/novosti_i_sobytiya/novost/news/detail/News/neobitaemaja_podvodnaja_stancija_oktavis_predstavlena/) (дата обращения: 26.11.2025).
6. Yazdani A.M., Sammut K., Yakimenko O., Lammass A. A survey of underwater docking guidance systems // Robotics and Autonomous Systems. 2020. Vol. 124. P. 103382. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337406819\\_A\\_survey\\_of\\_underwater\\_docking\\_guidance\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/337406819_A_survey_of_underwater_docking_guidance_systems) (дата обращения: 26.11.2025).
7. Podder T., Sibenac M., Bellingham J. Applications and Challenges of AUV Docking Systems Deployed for Long-term Science Missions // ResearchGate. P. 1–28. URL: [https://www.researchgate.net/publication/268057817\\_Applications\\_and\\_Challenges\\_of\\_AUV\\_Docking\\_Systems\\_Deployed\\_for\\_Long-term\\_Science\\_Missions](https://www.researchgate.net/publication/268057817_Applications_and_Challenges_of_AUV_Docking_Systems_Deployed_for_Long-term_Science_Missions) (дата обращения: 26.11.2025).
8. Torvestad J.Ch. UID™ Subsea Docking Station // Equinor. Underwater Intervention Drone (UID™) strategy. 28 May 2018. P. 1–12. URL: <https://d26pw6xcscsd4up.cloudfront.net/1549374480/04-jan-christian-torvestad-uid-subsea-docking-station.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).
9. Костенко В.В., Быканова А.Ю., Михайлов Д.Н., Ремезков А.В. Станция подводного обслуживания гибридного необитаемого подводного аппарата системы мониторинга подводного добычного комплекса // Подводные исследования и робототехника. 2024. №1 (47). С. 4–18. URL: [http://imtr-journal.ru/netcat\\_files/39/64/4\\_16\\_ru.pdf](http://imtr-journal.ru/netcat_files/39/64/4_16_ru.pdf) (дата обращения: 26.11.2025).
10. Beckman J. Subsea docking station opens path for resident underwater drones // Offshore. Nov. 2. 2020 URL: <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/14185568/subsea-docking-station-opens-path-for-resident-underwater-drones> (дата обращения: 09.07.2025).
11. Phamduy P., Cheong J., Porfiri M. An Autonomous Charging System for a Robotic Fish // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 21. Issue: 6, December 2016. P. 2953–2963. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7494612> (дата обращения: 26.11.2025).
12. Горлов А.А. Зарядные станции автономных робототехнических систем океанологических исследований // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 4. С. 27–35. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1253> (дата обращения: 26.11.2025).
13. Junjiang Zh., Zongxun S., Shumin L., Jianpin Y., Zhigang L. Review on cabled seafloor observatories in the world // Journal of Tropical Oceanography. 2017. Vol. 36. Issue 3. P. 20–33. URL: <https://www.jto.ac.cn/EN/10.11978/2016094?refererToken=533545a95e3f4ae59c06c1f8a3abed7f> (дата обращения: 26.11.2025).
14. В Петербурге создали подводную станцию с роботами-«кальмарами», которые помогут искать нефть и газ в морях Арктики // Энергия +. Онлайн-журнал об энергетике. 3 ноября 2023. URL: <https://e-plus.media/news/v-peterburge-sozdali-podvodnuyu-stanciyu-s-robotami-kalmarami-kotorye-pomogut-iskat-neft-i-gaz-v-moryah-arktiki/> (дата обращения: 26.11.2025).
15. Maersk Supply Service launches new venture company, Stillstrom, to deliver offshore vessel charging // Stillstrom. January 24th. 2022. URL: <https://stillstrom.com/news/maersk-supply-service-launches-new-venture-company-stillstrom-to-deliver-offshore-vessel-charging> (дата обращения: 26.11.2025).
16. Chen M., Vivekanandan R., Rusch C.J., Okushemiya D., Manalang D., Robertson B., Hollinger G.A. A unified simulation framework for wave energy powered underwater vehicle docking and charging // Applied Energy. 2024. Vol. 361. P. 122877. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924002605> (дата обращения: 26.11.2025).
17. Sun X., Deng B., Zhang J., Kelly M., Alam R., Makiharju S. Reimagining Autonomous Underwater Vehicle Charging Stations with Wave Energy // Berkeley Scient. Journal. Spring 2021. P. 74–78. URL: <https://escholarship.org/content/qt7hs535wq/qt7hs535wq.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).
18. Лощенков В.В., Княжев В.В., Копылов В.В., Кирик Н.С. Морская волновая энергетическая установка: Патент на полезную модель RU 145688, F03B13/12. Бюл. №27. 2014.
19. Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В. К вопросу энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Т. 3, № 401. С. 103–104. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-energoobespecheniya-rezidentnyh-podvodnyh-robotov-i-robototekhnicheskikh-kompleksov/viewer> (дата обращения: 26.11.2025).
20. Jones J.A., Chao Y., Curtin T. Submerged AUV Charging Station NTRS // NASA Tech Briefs. January 2014. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140002351> (дата обращения: 26.11.2025).
21. Otsubo A., Haga K., Komata Y. Fast reactor system for underwater activities // Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo, Japan. 2000. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/852554/authors#authors> (дата обращения: 26.11.2025).
22. ЦКБ МТ «Рубин» создал проект подводного энергокомплекса // SUDOSTROENIE INFO. 12 Августа 2016. URL: <https://sudostroenie.info/novosti/16784.html> (дата обращения: 26.11.2025).
23. Радионуклидный термоэлектрический генератор // Машиностроение. Энциклопедия / Главный редактор акад. РАН Фролов К.В. 2005. С. 569–575. URL: [https://elibrary.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki\\_kn2\\_2005/p570/](https://elibrary.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn2_2005/p570/) (дата обращения: 29.01.2026).
24. Subsea charging station designed to enable AUV operations // Offshore. 3. Dec. 2018 URL: <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/16761957/subsea-charging-station-designed-to-enable-auv-operations> (дата обращения: 09.07.2025).
25. Maslin E. Putting Power on the Seafloor is a Fuel Cell Future // Marine Technology News. 2022. March 1. URL: <https://www.marinetechologynews.com/news/putting-power-seafloor-future-617733> (дата обращения: 26.11.2025).
26. New efficient and sustainable energy supply on the seafloor. Submarine fuel cell successfully tested // GEOMAR. 17.12.2021. URL: <https://www.geomar.de/en/news/article/neue-leistungsfahige-und-nachhaltige-energieversorgung-am-meeresboden> (дата обращения: 26.11.2025).
27. Knyazhev V.V., Loshchenkov V.V. Storage of Reagents for Fuel Cells in the AUV // International Conference on Ocean Studies (ICOS). P.163–167. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10775916> (дата обращения: 26.11.2025).
28. В Росатоме созданы баллоны сверхвысокого давления для хранения и транспортировки водорода // АТОММЕДИА: пресс-релиз. 24 января 2024. URL: <https://atommedia.online/press-releases/v-rosatome-sozdany-ballony-sverhvyu/> (дата обращения: 26.11.2025).
29. Электрохимические генераторы HG30W / HG60W // HydrogenEnergy. URL: <https://energy-hydrogen.ru/productPage-3.htm> (дата обращения: 26.11.2025).
30. Опыт разработок филиала ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» энергоустановок на топливных элементах транспортного и стационарного применения. Санкт-Петербург, 2020. URL: [https://portal.tpu.ru/files/conferences/htf/landgraf\\_new.pdf](https://portal.tpu.ru/files/conferences/htf/landgraf_new.pdf) (дата обращения: 26.11.2025).
31. Михайлов Д.Н., Найденко Н.А., Борейко А.А. Опыт разработки и испытаний систем энергообеспечения АНПА // Пятая Всеросс. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: ИПМТ, 2013. С. 118–124.
32. Наша продукция // Аккумуляторная компания «Ригель». URL: <https://rigel.ru/products/> (дата обращения: 26.11.2025).
33. Polymer Li-Ion Cell: 3.7V 21Ah (1055275-2C, 77.7Wh, 42A rate) – UN38.3 Passed. AA Portable Power Corp. URL: <https://www.batteryspace.com/polymer-li-ion-cell-3-7v-21ah-1055275-2c-77-7wh-42a-rate---un38-3-passed-dgr.aspx> (дата обращения: 26.11.2025).

## Справка об авторах

**КНЯЖЕВ Валерий Викторович**, к.т.н., лаборатория энергетики подводных робототехнических комплексов, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН)

**Адрес места работы:** Владивосток, Суханова, 5а

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, энергоснабжение АНПА

**E-mail:** kvv@marine.febras.ru

**ЛОЩЕНКОВ Владимир Васильевич**, научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН)

**Адрес места работы:** Владивосток, Суханова, 5а

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, энергоснабжение АНПА

**E-mail:** lvv@marine.febras.ru



# ENERGY SOURCES FOR AUV DOCKING CHARGING STATIONS

V.V. Knyazhev, V.V. Loshchenkov

To ensure long-term autonomous operation of autonomous underwater vehicles (AUVs) without the need to return to port or be lifted to a carrier vessel, the use of charging docking stations is proposed. These docking stations will charge the AUV's onboard batteries, which can then store and transmit information received from the AUV. Charging docking stations for this purpose must have power sources capable of supplying energy indefinitely or with periodic, but rather rare refueling. Power supply options for charging docking stations via cable lines, nuclear power sources, hydrogen fuel cells, and renewable energy sources such as wind, wave, solar, current energy, thermal energy from water layers with different temperatures, and salinity gradient energy are considered. The energy reserves at a charging docking station using a hydrogen fuel cell stack depend on the capacity of the reactant storage system. Parameters of the system with Russian-produced fuel cell stacks and high-pressure gas cylinders are estimated. The energy and power of the charging station required for charging the MT-2010 and MT-2013 devices developed at the Institute of Marine Technology Problems FEB RAS have been determined.

**Keywords:** charging dock station, AUV, energy sources, renewable energy sources, nuclear, hydrogen fuel cells.

## References

- Jin L., Cui W. On technical issues for underwater charging of robotic fish schools using ocean renewable energy // *Ships and Offshore Structures* Published online: 10 Aug 2023. URL: [https://liuchao-jin.github.io/files/my\\_essay/jin2023technical.pdf](https://liuchao-jin.github.io/files/my_essay/jin2023technical.pdf) (Access date: 26.11.2025).
- Illarionov G., Shcherbatyuk A., Kushnerik A., Kvashnin A. Docking station for Autonomous Underwater Vehicles. *Dual technologies*. 2011. No.1 (54). P. 13-21. URL: <https://pstmprint.ru/wp-content/uploads/2016/04/dt-1-2011-3.pdf> (Access date: 26.11.2025).
- Stokey R., Allen B., Austin T., Goldsborough R., Forrester N., Purcell M. Enabling technologies for REMUS docking: an integral component of an autonomous ocean-sampling network // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. Vol. 26. Issue: 4. October 2001. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/972082> (Access date: 09.07.2025).
- Underwater Vehicle Charging: Autonomous Underwater Vehicles, Unmanned Underwater Vehicles, and Remotely Operated Vehicles // *Powering the Blue Economy™: Exploring Opportunities for Marine Renewable Energy in Maritime Markets*. Water Power Technologies Office. Marine Energy Program. April 2019. P. 23–37. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/09/f66/73355-v2.pdf> (Access date: 26.11.2025).
- The unmanned underwater station “Octavis” is presented at the exhibition “Army-2024” 08/12/2024, JSC “TsKB “Rubin”. URL: [https://ckb-rubin.ru/mediacentr/novosti\\_i\\_sobytiya/novost/news/detail/News/neobitaemaja\\_podvodnaja\\_stancija\\_oktavis\\_predstavlena/](https://ckb-rubin.ru/mediacentr/novosti_i_sobytiya/novost/news/detail/News/neobitaemaja_podvodnaja_stancija_oktavis_predstavlena/) (Access date: 26.11.2025).
- Yazdani A.M., Sammut K., Yakimenko O., Lammas A. A survey of underwater docking guidance systems // *Robotics and Autonomous Systems*. 2020. Vol. 124. P. 103382. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337406819\\_A\\_survey\\_of\\_underwater\\_docking\\_guidance\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/337406819_A_survey_of_underwater_docking_guidance_systems) (Access date: 26.11.2025).
- Podder T., Sibenac M., Bellingham J. Applications and Challenges of AUV Docking Systems Deployed for Long-term Science Missions // *ResearchGate*. P. 1–28. URL: [https://www.researchgate.net/publication/268057817\\_Applications\\_and\\_Challenges\\_of\\_AUV\\_Docking\\_Systems\\_Deployed\\_for\\_Long-term\\_Science\\_Missions](https://www.researchgate.net/publication/268057817_Applications_and_Challenges_of_AUV_Docking_Systems_Deployed_for_Long-term_Science_Missions) (Access date: 26.11.2025).
- Torvestad J.Ch. UID™ Subsea Docking Station // Equinor. Underwater Intervention Drone (UID™) strategy. 28 May 2018. P. 1–12. URL: <https://d26pw6xc4up.cloudfront.net/1549374480/04-jan-christian-torvestad-uid-subsea-docking-station.pdf> (Access date: 26.11.2025).
- Kostenko V.V., Bykanova A.Yu., Mikhailov D.N., Remezkov A.V. Underwater maintenance station of hybrid unmanned underwater vehicle monitoring system for oil and gas production complex. *Underwater Investigation and Robotics*. 2024. N. 1 (47). P. 4–18. URL: [http://imtp-journal.ru/netcat\\_files/39/64/4\\_16\\_ru.pdf](http://imtp-journal.ru/netcat_files/39/64/4_16_ru.pdf) (Access date: 26.11.2025).
- Beckman J. Subsea docking station opens path for resident underwater drones // *Offshore*. Nov. 2. 2020. URL: <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/14185568/subsea-docking-station-opens-path-for-resident-underwater-drones> (Access date: 09.07.2025).
- Phamduy P., Cheong J., Porfiri M. An Autonomous Charging System for a Robotic Fish // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 21. Issue: 6, December 2016. P. 2953–2963. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7494612> (Access date: 26.11.2025).
- Gorlov A.A. Charging stations of autonomous robot technical systems of oceanological research. *Scientific Review*. Technical science. 2019. No. 4. P. 27–35. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1253> (Access date: 26.11.2025).
- Junjiang Zh., Zongxun S., Shumin L., Jianpin Y., Zhigang L. Review on cabled seafloor observatories in the world // *Journal of Tropical Oceanography*. 2017. Vol. 36. Issue 3. P. 20–33. URL: <https://www.jto.ac.cn/EN/10.11978/2016094?refererToken=533545a95e3f4ae59c06c1f8a3a6cd7f> (Access date: 26.11.2025).
- An underwater station with robotic “squids” has been created in St. Petersburg to help search for oil and gas in the Arctic seas. *Energy +*. Online magazine about energy. November 3, 2023. URL: <https://e-plus.media/news/v-peterburge-sozdali-podvodnuyu-stancziyu-s-robotami>

kalmarami-kotorye-pomogut-iskat-neft-i-gaz-v-moryah-arktiki/ (Access date: 26.11.2025).

15. Maersk Supply Service launches new venture company, Stillstrom, to deliver offshore vessel charging // Stillstrom. January 24th. 2022. URL: <https://stillstrom.com/news/maersk-supply-service-launches-new-venture-company-stillstrom-to-deliver-offshore-vessel-charging> (Access date: 26.11.2025).

16. Chen M., Vivekanandan R., Rusch C.J., Okushemiya D., Manalang D., Robertson B., Hollinger G.A. A unified simulation framework for wave energy powered underwater vehicle docking and charging // *Applied Energy*. 2024. Vol. 361. P. 122877. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924002605> (Access date: 26.11.2025).

17. Sun X., Deng B., Zhang J., Kelly M., Alam R., Makiharju S. Re-imagining Autonomous Underwater Vehicle Charging Stations with Wave Energy // *Berkeley Scient. Journal*. Spring 2021. P. 74–78. URL: <https://escholarship.org/content/qt7hs535wq/qt7hs535wq.pdf> (Access date: 26.11.2025).

18. Loshchenkov V.V., Knyazhev V.V., Kopylov V.V., Kirik N.S. Marine wave power plant Patent for utility model RU 145688, F03B13/12, 2014. Bull. No. 27.

19. Martynov A.A., Samsygin V.K., Sokolov D.V. On the issue of energy supply for resident underwater robots and robotic complexes. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2022. Vol. 3, No. 401. P. 103–104. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-energoobespecheniya-rezidentnyh-podvodnyh-robotov-i-robototekhnicheskikh-kompleksov/viewer> (Access date: 26.11.2025).

20. Jones J.A., Chao Y., Curtin T. Submerged AUV Charging Station NTRS // NASA Tech Briefs. January 2014. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140002351> (Access date: 26.11.2025).

21. Otsubo A., Haga K., Komata Y. Fast reactor system for underwater activities // Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo, Japan. 2000. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/852554/authors#authors> (Access date: 26.11.2025).

22. “The Central Design Bureau of Marine Engineering “Rubin” has created a project for an underwater energy complex”. SUDOSTROENIE INFO, August 12, 2016. URL: <https://sudostroenie.info/novosti/16784.html> (Access date: 26.11.2025).

23. Radio-nuclide thermoelectric generator Mechanical engineering. Encyclopedia. 2005. Editor-in-chief Academician K.V. Frolov of the Russian Academy of Sciences. P. 569-575. URL: [https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki\\_kn2\\_2005/p570/](https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn2_2005/p570/) (Access date: 29.01.2026).

24. Subsea charging station designed to enable AUV operations // Offshore. 3. Dec. 2018 URL: <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/16761957/subsea-charging-station-designed-to-enable-auv-operations> (Access date: 09.07.2025).

25. Maslin E. Putting Power on the Seafloor is a Fuel Cell Future // *Marine Technology News*. 2022. March 1. URL: <https://www.marine-technologynews.com/news/putting-power-seafloor-future-617733> (Access date: 26.11.2025).

26. New efficient and sustainable energy supply on the seafloor. Submarine fuel cell successfully tested // GEOMAR. 17.12.2021. URL: <https://www.geomar.de/en/news/article/neue-leistungsfahige-und-nachhaltige-energieversorgung-am-meeresboden> (Access date: 26.11.2025).

27. Knyazhev V.V., Loshchenkov V.V. Storage of Reagents for Fuel Cells in the AUV // International Conference on Ocean Studies (ICOS). P. 163–167. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10775916> (Access date: 26.11.2025).

28. Rosatom has created ultra-high pressure cylinders for storing and transporting hydrogen. ATOMMEDIA. PRESS RELEASE. January 24, 2024. URL: <https://atommedia.online/press-releases/v-rosatome-sozdany-ballony-sverhvy/> (Access date: 26.11.2025).

29. Electrochemical generators HG30W / HG60W. HydrogenEnergy. URL: <https://energy-hydrogen.ru/productPage-3.htm> (Access date: 26.11.2025).

30. Experience of developments of the branch of the Central Research Institute of SET of the Federal State Unitary Enterprise Krylov State Research Center of power plants on fuel cells for transport and stationary use. Federal State Unitary Enterprise Krylov State Research Center. Saint Petersburg, 2020 URL: [https://portal.tpu.ru/files/conferences/htf/landgraf\\_new.pdf](https://portal.tpu.ru/files/conferences/htf/landgraf_new.pdf) (Access date: 26.11.2025).

31. Mikhailov D. N., Naidenko N.A., Boreiko A.A., Experience in the development and testing of AUV power supply systems. Fifth All-Russian Scientific and Technical Conference “Technical Problems of the Development of the World Ocean”, Vladivostok. IMTP. 2013. P. 118-124.

32. Our products. Battery company “Rigel” [Online]. Available: <https://rigel.ru/products/>, URL: <https://rigel.ru/products/> (Access date: 26.11.2025).

33. Polymer Li-Ion Cell: 3.7V 21Ah (1055275-2C, 77.7Wh, 42A rate) – UN38.3 Passed. AA Portable Power Corp. URL: <https://www.batteryspace.com/polymer-li-ion-cell-3-7v-21ah-1055275-2c-77-7wh-42a-rate--un38-3-passed-dgr.aspx> (Access date: 26.11.2025).

## Information about the authors

**KNYAZHEV Valeriy Viktorovich**, Ph.D., Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems, Senior Researcher

**Name of institution:** Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMTP FEB RAS).

**Work address:** 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5.

**Research Interests** renewable energy sources, power supply for AUVs

**E-mail** kvv@marine.febras.ru

**LOSHCHENKOV Vladimir Vasilievich**, Senior Researcher, Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems

**Name of institution:** Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMTP FEB RAS).

**Work address:** 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5.

**Research Interests** renewable energy sources, power supply for AUVs

**E-mail** lvv@marine.febras.ru

