

Научная статья
УДК 623.827
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-15-22>
EDN GBFUKW

Определение характеристик систем хранения и генерации реагентов для морского подводного объекта с электрохимическим генератором

**Константин Викторович Долгий, Александр Николаевич Дядик,
Николай Павлович Малых**[✉]

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия, malyh@smtu.ru*[✉]

Аннотация. Автономность морских подводных объектов определяется типом используемой на них энергии вместе с запасами горючего и окислителя. Морские подводные объекты небольшого водоизмещения с малым временем подводной миссии, как правило, оснащаются литий-ионными аккумуляторными батареями. Часть энергетических установок морских подводных объектов содержат воздухонезависимую энергетику, предполагается использовать как энергоисточник электрохимический генератор с водородом в качестве топлива и кислородом в качестве окислителя. Отмечена актуальность оценки перспективности того или иного способа хранения реагентов в составе энергоустановки с электрохимическим генератором. Использование энергоустановки с электрохимическим генератором определяется возможностью размещения на морском подводном объекте необходимого для выполнения заданной подводной миссии количества водорода и кислорода. Рассмотрены вопросы размещения реагентов (водорода и кислорода), необходимых для функционирования электрохимического генератора в составе воздухонезависимой энергетической установки морского подводного объекта. Приводятся зависимости для определения необходимых запасов реагентов на морских подводных объектах для выполнения заданной подводной миссии. Доказано, что наиболее приемлемым вариантом для морских подводных объектов большого водоизмещения является криогенное хранение кислорода. Для гипотетической мощности электрохимического генератора получены численные значения массы водорода и кислорода. Исследованы возможности размещения баллонной системы хранения водорода как наиболее приемлемой для размещения на небольших неатомных подводных лодках и автономных необитаемых подводных аппаратах. Приведены типы водородных баллонов, способных работать в широком диапазоне параметров окружающей среды при внутреннем давлении водорода свыше 40 МПа. Представлена возможная схема размещения баллонов с водородом и кислородом вне корпуса автономного необитаемого подводного аппарата и приведены основные зависимости для расчетов емкости баллонной системы хранения реагентов с учетом свойств реальных газов.

Ключевые слова: реагент, водород, кислород, морской подводный объект, топливный элемент, электрохимический генератор, энергоустановка, баллонная система хранения, давление, температура, масса, объем, лейнер, металлокомпозит

Для цитирования: Долгий К. В., Дядик А. Н., Малых Н. П. Определение характеристик систем хранения и генерации реагентов для морского подводного объекта с электрохимическим генератором // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 1. С. 15–22. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-15-22>. EDN GBFUKW.

Original article

Determining characteristics of reagent storage and generation systems for marine submersible with electrochemical generator

Konstantin V. Dolgiy, Alexandr N. Dyadik, Nikolai P. Malykh[✉]

*Saint-Petersburg State Marine Technical University,
Saint-Petersburg, Russia, malyh@smtu.ru*[✉]

Abstract. Autonomy of the marine submersibles is specified by the type of energy, fuel and oxidizers they use. As a rule, marine underwater objects of small displacement with a short underwater mission time are equipped with lithium-ion batteries. A number of the submersible power plants have air-independent energy, which allows using an electrochemical generator (ECG) as energy source fueled by hydrogen and applying oxygen as oxidizer. Each method of storing reagents as part of an ECG power plant has been assessed promising. Using an ECG power plant is determined by the possibility of placing on a marine underwater object the amounts of hydrogen and oxygen necessary to perform a specific underwater mission. There have been considered the issues of placing the reagents (hydrogen and oxygen) necessary for ECG functioning as part of an air-independent power plant of a marine submersible. There are given the dependencies to determine necessary reagent amounts on the submersible to perform an underwater mission. Cryogenic oxygen storage has been proved the most acceptable option for large-displacement marine underwater objects. Numerical values of the hydrogen and oxygen mass are obtained for the hypothetical ECG capacity. The possibilities of placing a balloon hydrogen storage system as the most acceptable for placement on small non-nuclear submarines and autonomous unmanned submersible apparatus are considered. Types of hydrogen tanks capable to operate in a wide range of environmental parameters at internal hydrogen pressure over 40 MPa are given. Available arrangement of tanks with hydrogen and oxygen outside the hull of an autonomous unmanned submersible is presented and the main dependencies for calculating the capacity of a balloon storage system of reagents subject to the gas properties are given.

Keywords: reagent, hydrogen, oxygen, marine underwater object, fuel cell, electrochemical generator, power plant, balloon storage system, pressure, temperature, mass, volume, liner, metal composite

For citation: Dolgiy K. V., Dyadik A. N., Malykh N. P. Determining characteristics of reagent storage and generation systems for marine submersible with electrochemical generator. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2023;1:15-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-15-22>. EDN GBFUKW.

Введение

Автономность морского подводного объекта (МПО) в первую очередь зависит от типа используемой на нем энергетики вместе с запасами горючего и окислителя. Как правило, МПО небольшого водоизмещения с малым временем подводной миссии оснащается литий-ионными аккумуляторными батареями. В статье рассмотрена возможность применения электрохимического генератора (ЭХГ) как энергоисточника с водородом в качестве топлива и кислородом в качестве окислителя. При этом актуальной становится оценка перспективности того или иного способа хранения реагентов в составе энергоустановки с ЭХГ. Очевидно, что использование энергоустановки с ЭХГ определяется возможностью размещения на МПО необходимого для выполнения заданной подводной миссии количества водорода и кислорода.

Определение запасов реагентов на морском подводном объекте

Электрохимические эквиваленты реагентов (удельные расходы, г/(А·ч)) – величины постоянные: для водорода $k_{\text{в}} = 0,037$ г/(А·ч); для кислорода $k_{\text{к}} = 0,3$ г/(А·ч). Как следует из рассмотрения величин электрохимических эквивалентов, для работы ЭХГ требуется почти в 10 раз больше окислителя по сравнению с горючим. При известной вольт-амперной характеристике определяются удельные расходы реагентов, отнесенные к полученной энергии при данной плотности тока [1]:

$$g_{\text{в}} = \frac{k_{\text{в}}}{u_3} \quad \text{и} \quad g_{\text{к}} = \frac{k_{\text{к}}}{u_3},$$

где u_3 – напряжение топливного элемента (ТЭ).

Согласно приведенным зависимостям удельные расходы реагентов возрастают с увеличением нагрузки. Особенностью ЭХГ, отличающей его от тепловых двигателей, является практически однозначное изменение экономичности с изменением нагрузки (за исключением области малых нагрузок).

При переходе от единичного ТЭ к батарее топливных элементов (БТЭ) и далее к блоку ЭХГ возникают дополнительные потери:

- потери, обусловленные токами утечки;
- затраты мощности на вспомогательные нужды блока или энергетической установки (ЭУ) в целом, которые связаны с использованием системы термостатирования.

Токи утечки рассчитываются по обычным в электротехнике зависимостям, базирующимся на законах Кирхгофа. Практически для предварительных расчетов имеет значение максимальный ток в среднем (по местоположению в БТЭ) элементе, определяемый по формуле

$$I_{\text{ср}} = \frac{E}{R} \sum_{i=1}^{n-1} f_i(t),$$

где E – электродвижущая сила контура; R – сопротивление канала между ТЭ; n – число последовательно соединенных ТЭ; i – порядковый номер ТЭ; $f_i(t)$ – функция отношения $t = r / R$ и n , где r – сопротивление участка между каналами.

Затраты мощности на вспомогательные нужды (привод насосов, вентиляторов, агрегатов автоматики и т. д.) вычисляются обычными способами на соответствующих нагрузочных режимах с учетом КПД соответствующих агрегатов.

При наличии опытных данных по ТЭ (вольт-амперной характеристики), батареям и блокам ЭХГ, используются непосредственно эти данные. По ним определяются удельные и абсолютные расходы реагентов на различных нагрузочных режимах работы энергоустановки.

Следует отметить, что теоретический расчет удельных расходов реагентов может дать существенную погрешность, поскольку он в большой степени зависит от совершенства конструкции элементов, удачного выбора электродной структуры и катализаторов.

В достаточно отработанных образцах ЭХГ удельный расход водорода, в зависимости от нагрузки (плотности тока), составляет величину, изменяющуюся от $g_{\text{в}} = 0,045$ кг/(кВт·ч) при $i \approx 40 \div 50$ мА/см² до $g_{\text{в}} = 0,048$ кг/(кВт·ч) при $i \approx 100$ мА/см² и выше. Удельный расход кислорода приблизительно определяется по стехиометрическим соотношениям и составляет 0,36–0,38 кг/(кВт·ч) соответственно.

На начальной стадии расчетов запасов реагентов целесообразно принимать удельный расход водорода $g_{\text{в}} = 0,05$ кг/(кВт·ч) и кислорода $g_{\text{к}} = 0,4$ кг/(кВт·ч).

Следовательно, потребное количество водорода для одного цикла загрузки рассчитывается по формуле

$$G_{\text{H}_2} = N_{\text{ЭХГ}} g_{\text{в}} \tau,$$

где $N_{\text{ЭХГ}}$ – номинальная мощность батареи ЭХГ, кВт; $g_{\text{в}}$ – удельный расход водорода, кг/(кВт·ч); τ – время работы ЭХГ, ч.

Рассмотрим произвольный вариант работы ЭХГ для МПО относительно большого водоизмещения (среднего класса):

$$N_{\text{ЭХГ}} = 135 \text{ кВт}; \tau = 6 \text{ 500 ч } (\sim 9 \text{ мес.}).$$

Тогда $G_{\text{H}_2} = 135 \cdot 0,05 \cdot 6 \text{ 500} = 43 \text{ 875}$ – масса водорода, кг, размещаемого на борту МПО. Соответственно, количество кислорода, кг, на борту МПО для тех же условий: $G_{\text{O}_2} = 135 \cdot 0,4 \cdot 6 \text{ 500} = 351 \text{ 000}$.

Зная потребное количество водорода и кислорода, можно рассчитать необходимый объем систем их хранения на борту МПО. Определим длительность работы установки с ЭХГ системы «водород – кислород» для МПО при баллонной системе хранения реагентов.

Баллонная система хранения реагентов

Исходя из массогабаритных показателей понятно, что баллонная система хранения водорода и кислорода не может быть использована для МПО среднего класса с длительностью работы 9 мес.

Энергетический отсек морского объекта должен обладать нулевой плавучестью. Предположим,

что объем отсека $\sim 10 \text{ м}^3$; масса вытесняемой морской воды $\sim 10,25$ т. В настоящее время ООО «Центротех» (г. Новоуральск), входящим в госкорпорацию «Росатом», освоено производство топливных батарей для ЭХГ типа «Фрегат-2». Масса БТЭ мощностью 55 кВт составляет 500 кг. Поскольку масса батарей линейно связана с мощностью, то масса батареи ТЭ ООО «Центротех» мощностью 135 кВт составит $\sim 1 \text{ 200}$ кг; системы автоматики (25 % от массы БТЭ, по данным специалистов Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники и технологии) ~ 300 кг. Итого суммарная масса будет 1 500 кг. Исходя из этой массы определим время работы, ч, установки с ЭХГ для морского объекта:

$$\tau = \frac{M_{\text{р}}}{N_{\text{ЭХГ}} (g_{\text{в}} + g_{\text{к}})}; \quad \tau = \frac{8 \text{ 750}}{135 \cdot 0,45} = 144,$$

где $M_{\text{р}} = 10 \text{ 250} - 1 \text{ 500} = 8 \text{ 750}$ – остаточная масса, кг, энергоотсека МПО для размещения реагентов (водорода и кислорода), необходимых в установке с ЭХГ.

Таким образом, для рассматриваемых характеристик БТЭ и системы хранения водорода с кислородом, исходя из нулевой плавучести энергетического отсека, будет обеспечена работа ЭУ в течение 144 ч, или 6-и сут. Потребная масса водорода при этом составит 972 кг, а кислорода, соответственно, 7 776 кг.

Рассмотрим объемные характеристики систем хранения реагентов на морском объекте. Примем температуру хранения $T = 300$ К; газовую постоянную для водорода, соответственно, $R_{\text{H}_2} = 4 \text{ 157}$ Дж/(кг·К); давление в газовом баллоне $p = 20 \cdot 10^6$ Па. При таких условиях объем баллонной системы хранения водорода, м³:

$$V_{\text{в.с}} = \frac{972 \cdot 4 \text{ 157} \cdot 300}{20 \cdot 10^6} = 60,6.$$

Даже если увеличить давление в баллонах водорода в два раза, объем системы его хранения не позволит разместить ее в отсеке ЭУ морского объекта.

Далее с учетом объемных характеристик рассмотрим длительность миссии МПО. Наиболее близким прототипом к рассматриваемой БТЭ служит ЭХГ ВЗМ 120 германской разработки фирмы «Сименс» мощностью 120 кВт. Объем этой батареи $\sim 0,5 \text{ м}^3$. С учетом увеличения объема отечественного ЭХГ вместе с системой автоматики примем его объем равным $\sim 1 \text{ м}^3$. Тогда в энергоотсеке будет свободно 9 м^3 . Исходя из предыдущих выводов для длительности работы, ч, морского объекта с ЭХГ и баллонной системой хранения реагентов на основании уравнения Клапейрона – Клаузиуса:

$$\tau = \frac{V_{б.с} p}{N_{ЭХГ} T (R_{H_2} g_v + R_{O_2} g_k)};$$
$$\tau = \frac{9 \cdot 40 \cdot 10^6}{135 \cdot 300 \cdot (4157 \cdot 0,05 \cdot 260 \cdot 0,4)} = 28,5.$$

Таким образом, баллонная система хранения реагентов даже при давлении в водородных и кислородных баллонах 40 МПа по своим объемным характеристикам может обеспечить длительность работы ЭУ с ЭХГ МПО заданных габаритов в течение 28,5 ч.

Для заполнения баллонной системы водородом необходимо затратить работу, Дж:

$$W_{ск} = \frac{M_{H_2}}{\eta_{ж}} R_{H_2} T \ln \frac{p}{p_0};$$
$$W_{ск} = \frac{972}{0,5} \cdot 4157 \cdot 300 \ln \frac{20}{0,1} = 1,28 \cdot 10^{10},$$

что составляет 3 555 кВт·ч электроэнергии. Принимая стоимость электроэнергии 10 центов/(кВт·ч), получим затраты на заполнение баллонной системы – 350 долл. США.

Определим стоимость изготовления баллонной системы для хранения водорода. Поскольку системы хранения водорода для МПО относятся к уникальному виду оборудования, то определение начальных затрат при их проектировании затруднительно из-за отсутствия достаточной исходной информации. Часто в качестве определяющей технической характеристики принимается масса оборудования и используется зависимость

$$Z = bM_{б.с.},$$

где $M_{б.с.}$ – масса оборудования баллонной системы хранения, кг; b – удельные начальные затраты, долл./кг.

В качестве удельных начальных затрат примем стоимость материалов систем хранения водорода. Стоимость арматуры, креплений принимается в размере 80 % от стоимости баллонов, а стоимость монтажа составит приблизительно 20 % стоимости резервуаров хранения и арматуры [1]. Тогда, принимая во внимание стоимость титанового сплава – 35 долл. за 1 кг, получим стоимость изготовления баллонной системы хранения водорода – приблизительно 3 млн долл. США.

Рассмотрим варианты исполнения водородных баллонов высокого давления для инфраструктуры водородной энергетики, в частности материалы тонкостенной гермооболочки (лейнера), упрочняющей составляющей композиционной оболочки, защитного наружного слоя, а также конструкцию водородных баллонов.

Водородные баллоны высокого давления предназначены для хранения сжатого водорода в газообразном состоянии. Данные баллоны применяются для систем хранения водорода, в составе электролизных установок, для транспортировки водорода до потребителя, а также на предприятиях в разных отраслях отечественной промышленности [2].

Баллоны высокого давления широко применяются в промышленности. В настоящее время основным трендом становится разработка металлокомпозитных баллонов, состоящих из несущей стальной оболочки и композиционной обмотки. Применение в конструкции баллонов композиционных материалов на основе углеродных и арамидных волокон в сочетании с лейнером позволяет существенно снизить массу изделий по сравнению с цельнометаллическими баллонами [3].

Существующие металлокомпозитные баллоны, как правило, изготавливаются на основе алюминиевых, титановых или стальных лейнеров. При этом перспективным направлением совершенствования массовой эффективности металлокомпозитных баллонов считается максимально возможное снижение толщины лейнера [4].

Металлокомпозитный баллон конструктивно состоит из металлического лейнера (используются различные металлы в зависимости от наполняемого газа) и упрочняющей обмотки из углеродного волокна, стекловолокна или полиарамидных нитей либо их комбинации. Упрочняющая обмотка позволяет наполнять баллоны газами под высоким давлением – 40,0 МПа [5] и более в зависимости от объема баллонов. Для упрочнения баллонов высокого давления также используются различные схемы и методы намотки, позволяющие выбирать необходимые массогабаритные характеристики.

Для обеспечения технологичности изготовления баллонов высокого давления и их надежности при использовании на рабочих и аварийных давлениях применяются в комплексе две схемы намотки волокон – геодезическая по металлическому лейнеру, упрочняющая лейнер по длине, и радиальная рядная намотка, упрочняющая лейнер по диаметру [6]. При необходимости придания более высоких тактико-технических характеристик для ужесточения лейнера могут быть использованы предварительно намотанные с пропиткой препреги, а намотку (геодезическую и радиальную рядовую) можно комбинировать в соответствии с предварительно произведенными расчетами устойчивости баллонов высокого давления при нагружении разрывным давлением.

Классификация баллонов

Основные типы баллонов представлены на рис. 1.

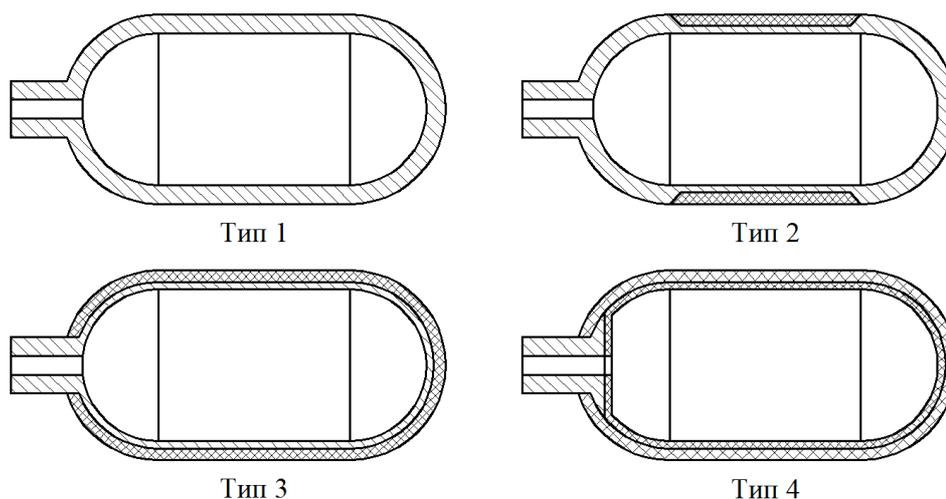


Рис. 1. Основные типы баллонов

Fig. 1. General types of tanks

Тип 1. Металлические баллоны.

Полностью металлическая конструкция из легированной или углеродистой стали. Отливается в специализированных резервуарах и не имеет швов. Баллон имеет горловину под вентиль в форме цилиндра с одной стороны и дно закругленной формы с другой. В процессе изготовления все резервуары подвергаются испытаниям избыточным давлением и проходят проверку ультразвуком для выявления скрытых дефектов. Прочная и надежная конструкция, проверенная годами. Несмотря на более современные технологии изготовления других типов, многие считают тип 1 наиболее надежной конструкцией.

Тип 2. Композитные баллоны с металлическим лейнером и кольцевой обмоткой.

Баллоны второго типа представляют собой металлопластиковую конструкцию из стального тонкостенного лейнера и упрочняющей оболочки из композитного материала на цилиндрической части лейнера. Изготовлены они из легированной конструкционной стали. Основная часть конструкции покрыта армирующей оболочкой. Заявлено, что сталь, которая применяется в данной конструкции, не изменяет своих физических свойств при низких температурах окружающей среды.

Тип 3. Композитные баллоны с металлическим лейнером и полной обмоткой.

Металлический лейнер баллонов третьего типа заключен в упрочняющую оболочку из композитного материала по всей поверхности баллона, включая днище и горловину. Отличительной особенностью является наличие алюминиевого лейнера, который усилен оплеткой из карбо волокна. Разрывное усилие составляет около 14,0 МПа. Оплетка пропитывается специально разработанным

составом на основе эпоксидной смолы. Плюсом данного типа конструкции является стойкость к коррозии на протяжении всего периода эксплуатации.

Тип 4. Композитные баллоны с полной обмоткой без металлического лейнера.

Четвертый тип имеет полимерный лейнер, усиленный упрочняющей оболочкой из углеродного волокна или композитного (углеродного/стекловолокна) материала. Основным плюсом баллона данного типа является его небольшая масса. К минусам же относится высокая хрупкость изделия при воздействии механических повреждений.

Патентный поиск проводился по конструкции, приведенной ниже. Баллон в сборе представляет собой лейнер, выполненный из стали, алюминия или титана с нанесенной упрочняющей оболочкой из композитного материала – углеродного волокна, пропитанного термостойкой эпоксидной смолой.

Конструкция баллона в сборе представлена на рис. 2.

Композитная оболочка баллонов высокого давления работоспособна и обеспечивает надежность баллонов высокого давления при температурах от -50 до $+50$ °С, в условиях воздействия гидростатического давления морской воды до 10 МПа при использовании компаунда на основе смолы эпоксидной диановой ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), диэтилглицоля ДЭГ-1 (ТУ 2225-027-00203306-97), триэтанолamina ТЭА (ТУ 2423-168-00203335-2007), ускорителя полимеризации УП606/2 (ТУ 2494-630-11131395-2006) или двухкомпонентного компаунда КДС-28 (ТУ 20.13-076-50050552-2018).

Долгий К. В., Дядик А. Н., Мальных Н. П. Определение характеристик систем хранения и генерации реагентов для морского подводного объекта с электрохимическим генератором

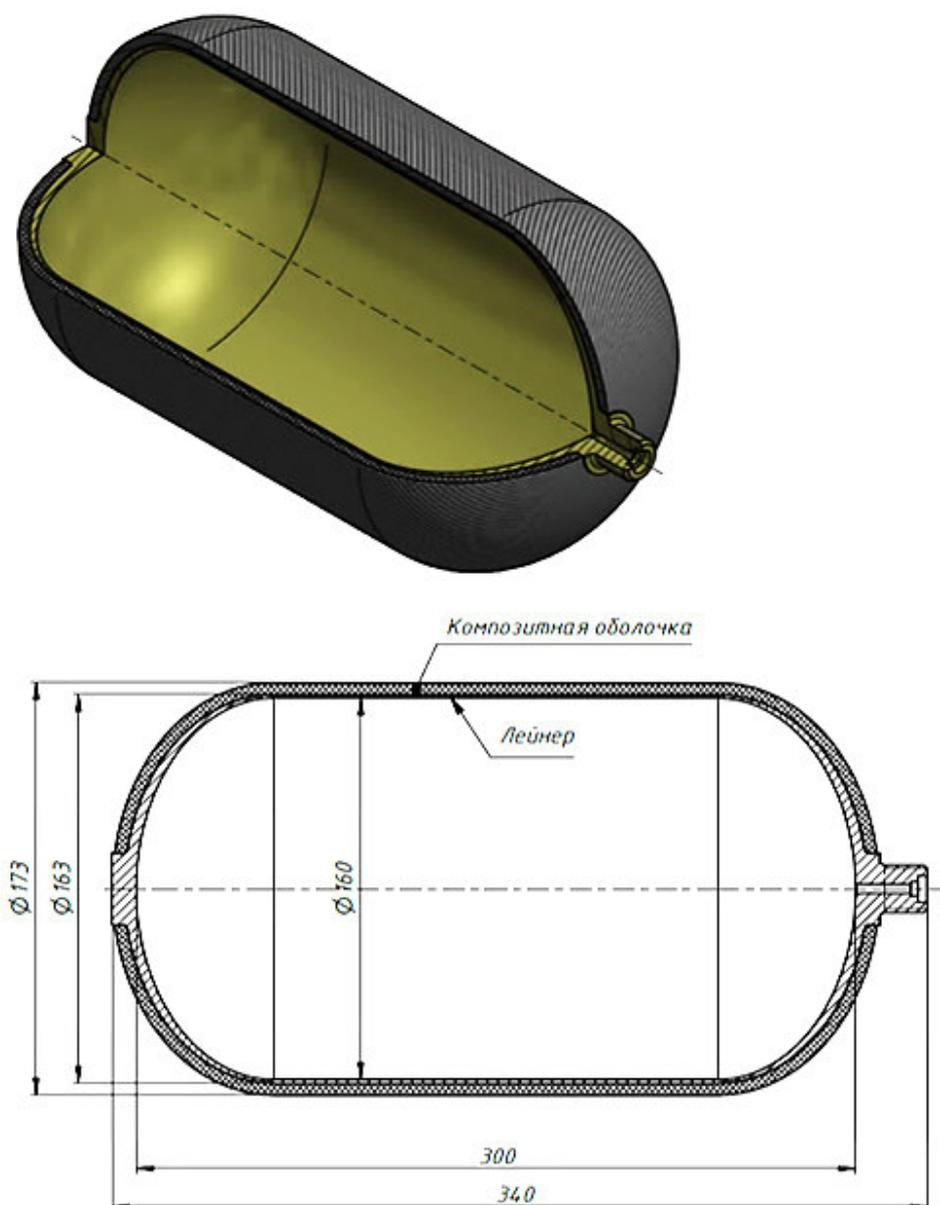


Рис. 2. Баллон в сборе

Fig. 2. Tank assembly

Суммарная негерметичность баллона составляет не более $5,1-3 \text{ н.см}^3/\text{ч}$ (при рабочем давлении).

Коэффициент безопасности баллона – 2,4.

Конструкция баллона выполнена из условия безосколочности в случае разрушения при рабочем давлении.

С целью определения свойства безосколочности проводятся специальные испытания баллонов до разрушения механическим воздействием при рабочем давлении.

В настоящее время МПО типа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с це-

лю обеспечения выполнения подводной миссии оснащаются литий-ионными аккумуляторными батареями. Однако повышение времени подводной миссии АНПА требует использования более энергоемких источников, к числу которых относятся ЭХГ. В отличие от МПО больших размеров, АНПА относительно небольшие и разместить внутри объема аппарата баллоны с водородом и кислородом достаточно сложно. В этом случае возможно их размещение снаружи корпуса (рис. 3).

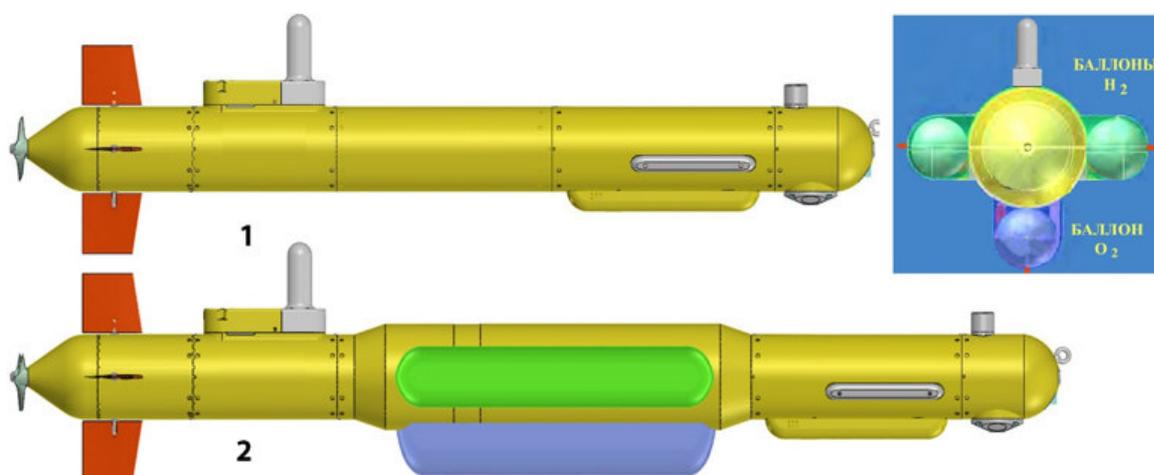


Рис. 3. Варианты компоновки автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА): 1 – с литий-ионной батареей; 2 – с электрохимическим генератором (ЭХГ) и размещением баллонов с реагентами снаружи корпуса

Fig. 3. Arrangement types of autonomous unmanned submersible apparatus (AUSAs): 1 – with a lithium-ion battery; 2 – with an electrochemical generator (ECG) and reagent tanks outside the hull

Для подобной схемы размещения реагентов расчет потребного объема баллонов производится с учетом отличия свойств реального газа от идеального в следующей последовательности.

Потребное значение объема баллона для водорода массой M_h при максимальной температуре заборной воды вычисляется следующим образом:

$$V_{h0} = \frac{M_h (T_{\max})}{\rho_h},$$

где $\rho_h = \frac{P_{h \max}}{k_h R_{H_2} T_0}$ – плотность газообразного водорода при максимальном давлении в баллоне; k_h – коэффициент сжимаемости водорода.

Потребное значение объема баллона для кислорода вычисляется следующим образом:

$$V_{q0} = \frac{M_q (T_{\max}) z_h \mu_h}{\rho_q z_q \mu_q},$$

где $\rho_q = \frac{P_{q \max}}{k_q R_{O_2} T_0}$ – плотность газообразного кислорода при максимальном давлении в баллоне; k_q – коэффициент сжимаемости кислорода; μ_h – молекулярная масса водорода; μ_q – молекулярная масса кислорода.

Значения коэффициентов сжимаемости водорода и кислорода вычисляются как корень следующего уравнения:

$$k - \frac{k}{k - bP} + a \frac{P}{k + bP} = 0,$$

где

$$k = \begin{cases} 1,26069 & \text{– для водорода;} \\ 0,996492 & \text{– для кислорода,} \end{cases}$$

$$P = \begin{cases} P_{h \max} & \text{– для водорода;} \\ P_{q \max} & \text{– для кислорода,} \end{cases}$$

$$a = \frac{0,4278}{P_{кр}} \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right)^{2,5}; \quad b = \frac{0,0867}{P_{кр}} \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right);$$

$$T_{кр} = \begin{cases} 239,9 \text{ } ^\circ\text{C} & \text{– для водорода;} \\ 118,8 \text{ } ^\circ\text{C} & \text{– для кислорода,} \end{cases}$$

$$P_{кр} = \begin{cases} 1,27 \text{ МПа} & \text{– для водорода;} \\ 35 \text{ МПа} & \text{– для кислорода.} \end{cases}$$

Заключение

Относительно размещения на МПО большого водоизмещения криогенного кислорода можно сказать, что это наиболее приемлемый вариант. Что касается размещения водорода на борту, то существует несколько вариантов его хранения. Однако для небольших МПО и автономных подводных аппаратов наилучшим вариантом является баллонное хранение водорода и кислорода. Для этого варианта хранения были рассмотрены многочисленные патентные исследования, доказавшие возможность хранения газообразного водорода под давлением свыше 40 МПа. Композитная оболочка баллонов высокого давления работоспособна и обеспечивает надежность баллонов высокого

давления при температурах от -50 до $+50$ °С, в условиях воздействия гидростатического давления морской воды до 10 МПа при использовании компаунда на основе эпоксидной диановой смолы. В России также разработаны и испытаны практиче-

ски безотказные вентиль-редукторы, обеспечивающие функции запорной арматуры газовых баллонов, поддержания перепада давления «после себя» в газовых магистралях воздушонезависимых ЭУ МПО.

Список источников

1. Дядик А. Н., Замуков В. В., Дядик В. А. Корабельные воздушонезависимые энергетические установки. СПб.: Судостроение. 2006. 424 с.
2. Пат. РФ № 2395749. Способ изготовления баллона высокого давления из полимерных композиционных материалов / Яиков В. П.; заявл. 16.03.2009; опубл. 27.07.2010.
3. Пат. РФ № 2432521. Металлокомпозитный баллон высокого давления / Лукьянец С. В., Мороз Н. Г.; заявл. 14.05.2009; опубл. 27.10.2011.
4. Пат. РФ № 2426024. Способ изготовления баллона высокого давления и устройство для его осуществле-

- ния / Клюин О. С.; заявл. 18.08.2009; опубл. 10.08.2011.
5. Пат. РФ № 2510476. Металлокомпозитный баллон высокого давления / Асеев А. В., Батурина Т. В., Горголевский Ю. Д., Губанов А. Л., Демкина Л. В., Клоков А. Н., Козлов С. Н., Осадчий Я. Г., Русинович Ю. И., Савенков А. В.; заявл. 27.12.2012; опубл. 27.03.2014.
6. Пат. РФ № 2620134. Способ изготовления металлопластикового баллона высокого давления / Халиманович В. И., Синьковский Ф. К., Бородин Л. М., Овечкин Г. И., Синиченко М. И., Воловиков В. Г.; заявл. 04.09.2015; опубл. 10.03.2017.

References

1. Diadik A. N., Zamukov V. V., Diadik V. A. *Korabel'nye vozdukhonезavisimye energeticheskie ustanovki* [Ship air-independent power plants]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2006. 424 p.
2. Iaikov V. P. *Sposob izgotovleniia ballona vysokogo davleniia iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Method of manufacturing high-pressure cylinder from polymer composite materials]. Patent RF, no. 2395749, 27.07.2010.
3. Luk'ianets S. V., Moroz N. G. *Metallokompozitnyi ballon vysokogo davleniia* [High-pressure metal-composite cylinder]. Patent RF, no. 2432521, 27.10.2011.
4. Kliuin O. S. *Sposob izgotovleniia ballona vysokogo davleniia i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [Method

- of manufacturing high-pressure cylinder and device for its implementation]. Patent RF, no. 2426024, 10.08.2011.
5. Aseev A. V., Baturina T. V., Gorgolevskii Iu. D., Gubanov A. L., Demkina L. V., Klokov A. N., Kozlov S. N., Osadchii Ia. G., Rusinovich Iu. I., Savenkov A. V. *Metallokompozitnyi ballon vysokogo davleniia* [High-pressure metal-composite cylinder]. Patent RF, no. 2510476, 27.03.2014.
6. Khalimanovich V. I., Sin'kovskii F. K., Borodin L. M., Ovechkin G. I., Sinichenko M. I., Volovikov V. G. *Sposob izgotovleniia metalloplastikovogo ballona vysokogo davleniia* [Method of manufacturing high-pressure metal-plastic cylinder]. Patent RF, no. 2620134, 10.03.2017.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 09.12.2022; принята к публикации 17.01.2023
The article was submitted 16.11.2022; approved after reviewing 09.12.2022; accepted for publication 17.01.2023

Информация об авторах / Information about the authors

Константин Викторович Долгий — аспирант кафедры теплофизических основ судовой энергетики; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; kon8917@yandex.ru

Konstantin V. Dolgiy — Postgraduate Student of the Department of Thermophysical Principles of Ship Power Engineering; Saint-Petersburg State Marine Technical University; kon8917@yandex.ru

Александр Николаевич Дядик — доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой теплофизических основ судовой энергетики; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; dyadik@rambler.ru

Alexandr N. Dyadik — Doctor of Sciences in Technology, Professor; Head of the Department of Thermophysical Principles of Ship Power Engineering; Saint-Petersburg State Marine Technical University; dyadik@rambler.ru

Николай Павлович Малых — кандидат технических наук; доцент кафедры теплофизических основ судовой энергетики; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; malyh@smtu.ru

Nikolai P. Malykh — Candidate of Sciences in Technology; Assistant Professor of the Department of Thermophysical Principles of Ship Power Engineering; Saint-Petersburg State Marine Technical University; malyh@smtu.ru

