

Ю.Н. Арсеньев, Р.А. Иванов, Ю.В. Копытов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМАЯ ЭНЕРГЕТИКА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является воздухонезависимая энергетическая установка подводных объектов. Цель исследований – оценка перспективности применения воздухонезависимых энергетических установок с литий-ионными аккумуляторными батареями.

Материалы и методы. Разработана расчетная методика вариантных расчетов необходимой суммарной энергоемкости подводного объекта для обеспечения заданного спектра режимов функционирования, позволяющая определять массогабаритные характеристики воздухонезависимой энергетической установки неатомной подводной лодки с литий-ионной аккумуляторной батареей.

Основные результаты. Приведены результаты сопоставления для конкретного подводного объекта массогабаритных параметров воздухонезависимой энергетической установки с литий-ионной аккумуляторной батареей с другими типами воздухонезависимой энергетики.

Заключение. Литий-ионная аккумуляторная батарея с позиций простоты управления и эксплуатационной надежности имеет несомненные преимущества по сравнению с другими типами воздухонезависимой энергетики.

Ключевые слова: воздухонезависимая энергетическая установка, литий-ионная аккумуляторная батарея, неатомные подводные объекты, энергоемкость, массогабаритные характеристики.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Арсеньев Ю.Н., Иванов Р.А., Копытов Ю.В. Воздухонезависимая энергетика подводных объектов на базе литий-ионных аккумуляторных батарей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 107–114.

УДК 623.627:629.5.03

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-107-114

Yu.N. Arseniev, R.A. Ivanov, Yu.V. Kopytov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

AIR-INDEPENDENT POWER FOR SUBMERSIBLES BASED ON LITHIUM-ION BATTERIES

Object and purpose of research. This study deals with air-independent power systems for submersibles. The purpose is to assess the merits of air-independent system with Li-Ion battery.

Materials and methods. A method of calculation is developed for estimating the total power of a submersible required to support the specified modes of operation. This method makes it possible to determine the weight and size parameters of an air-independent Li-Ion based powerplant of a conventional submarine.

Main results. Weight and size characteristics of the air-independent Li-Ion battery power system under consideration are compared with other types of AIP systems for a specific submersible.

Conclusion. The Li-Ion battery solution has obvious advantages over other types of AIP systems, providing simple control and reliable operation.

Key words: air-independent power plant, lithium-ion battery, conventional submersibles, energy storage capacity, weight and size characteristics.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Arseniev Yu.N., Ivanov R.A., Kopytov Yu.V. Air-independent power for submersibles based on lithium-ion batteries. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 107–114 (in Russian).

UDC 623.627:629.5.03

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-107-114



Введение

Introduction

Цель работы – оценка перспективности применения воздухонезависимых энергетических установок (ВНЭУ) с литий-ионными аккумуляторными батареями (ЛИАБ) неатомных подводных объектов (ПО).

Рассмотрение состояния работ в области воздухонезависимой энергетике неатомных подводных лодок (ПЛ) показывает, что внимание индустриально развитых стран, участвующих в создании подводного флота, традиционно сосредоточено на следующих направлениях [1]. Это энергетические установки (ЭУ) с двигателями внутреннего сгорания замкнутого цикла (Россия, Германия, Англия, Япония, Китай, Италия), энергетические установки с двигателями Стирлинга замкнутого цикла (Швеция, Япония, Китай), энергетические установки с паротурбинными и газотурбинными двигателями замкнутого цикла (Франция, Россия), энергетические установки с электрохимическими генераторами (ЭХГ) водородно-кислородного типа (Германия, Россия, Япония, Южная Корея).

В течение более 100 лет в качестве силовых источников электроэнергии на подводных лодках применялись практически только свинцово-кислотные батареи. По сравнению с новыми системами аккумуляторных батарей (АБ) на основе лития и его соединений свинцово-кислотные АБ обладают рядом существенных недостатков, таких как низкая плотность мощности и энергии, выделение водорода, сульфатация, необходимость обслуживания.

Следует отметить, что внедрение ВНЭУ в подводном кораблестроении сопровождается существенным усложнением всего электроэнергетического комплекса подводных объектов и приводит к ухудшению показателей эксплуатационной надежности как собственно энергетической установки, так и корабля в целом. Именно поэтому во всем мире продолжается поиск и разработка перспективных АБ, используемых в виде основного источника энергии для обеспечения подводных режимов эксплуатации, с параметрами, существенно превышающими свинцово-кислотные АБ, удельные массогабаритные характеристики которых сегодня практически достигли предельных значений.

Анализ содержания официальных опубликованных отечественных и зарубежных данных, а также многочисленной информации, имеющейся в интернете [2–4], позволяет утверждать, что по совокупности показателей перспективных АБ предпочтительными оказываются литий-ионные

аккумуляторные батареи, нашедшие повсеместное использование в слаботочной электротехнике и интенсивно внедряемые в силовых электроэнергетических системах.

Первичные элементы с литиевым анодом появились в начале 70-х гг. XX века и быстро нашли применение благодаря большой удельной энергии и другим достоинствам. Таким образом, было осуществлено давнее стремление создать химический источник тока с наиболее активным восстановителем – щелочным металлом, что позволило резко повысить как рабочее напряжение аккумулятора, так и его удельную энергию. Из-за свойственной металлическому литию нестабильности, особенно в процессе заряда, исследования сместились в область создания аккумулятора без применения Li, но с использованием его ионов. Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) обеспечивают незначительно меньшую энергетическую плотность, чем литиевые аккумуляторы, но Li-ion аккумуляторы безопасны при обеспечении правильных режимов заряда и разряда.

Революцию в развитии перезаряжаемых литиевых аккумуляторов совершило сообщение о том, что в Японии разработаны аккумуляторы с отрицательным электродом из углеродных материалов. Углерод оказался весьма удобной матрицей для интеркаляции лития. Для того чтобы напряжение аккумулятора было достаточно большим, японские исследователи использовали в качестве активного материала положительного электрода оксиды кобальта. Потенциал литированного оксида кобальта составляет около 4 В относительно литиевого электрода, поэтому рабочее напряжение Li-ion аккумулятора имеет характерное значение 3 В и выше.

При разряде Li-ion аккумулятора происходит деинтеркаляция лития из углеродного материала (на отрицательном электроде) и интеркаляция лития в оксид (на положительном электроде). При заряде аккумулятора процессы идут в обратном направлении. Следовательно, во всей системе отсутствует металлический (нуль-валентный) литий, а процессы разряда и заряда сводятся к переносу ионов лития с одного электрода на другой. Поэтому такие аккумуляторы получили название «литий-ионных».

В частности, например, в работе [2] указывается, что на сегодняшний день достигнуты следующие максимально возможные значения удельных характеристик современных ЛИА (в скобках приведены значения для свинцово-кислотных АБ):

- удельная массовая энергия: до 250 Вт·ч/кг (33);
- удельная объемная энергия: до 670 Вт·ч/дм³ (73);

- удельная массовая мощность: до 2 кВт/кг (0,4);
- удельная объемная мощность: до 4 кВт/дм³ (0,8).

В литературе также отмечается, что литий-ионные аккумуляторы, в отличие от свинцово-кислотных, значительно более безопасны в эксплуатации, т.к. полностью герметичны и не выделяют никаких газов. Кроме того, в ЛИА отсутствует свободный электролит, поэтому этот источник электроэнергии может работать в любом пространственном положении.

Также преимуществами ЛИА являются [4]:

- сокращенное время заряда (до 2 ч вместо 8–10 ч для свинцово-кислотных АБ);
- возможность «дробного заряда» аккумуляторов во время перерывов в работе;
- существенно возросший срок службы (более 3000 циклов «заряд – разряд» вместо 1500 циклов для свинцово-кислотных АБ);
- максимальная эффективность использования емкости (допустимая глубина разряда более 90 %).

Т.е. в целом можно констатировать, что литий-ионная электрохимическая система, имея высокие энергетические и эксплуатационные характеристики, является достаточно привлекательной для проектирования и создания ЛИА и ЛИАБ с требуемыми показателями для различных подводных объектов, сохраняя при этом все положительные качества электроэнергетических установок, свойственные ЭУ мирового подводного флота со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями, а в вопросах взрывобезопасности и превышая их.

Более того, прочная и герметичная конструкция ЛИАБ позволяет осуществлять размещение батареи подводного объекта на принципиально новом уровне с учетом реальной возможности как рассредоточенного размещения на ПО и работоспособности в любом пространственном положении, так и забортного размещения всей ЛИАБ или ее части.

Методика расчета энергоемкости неатомной воздухонезависимой энергетической установки

Method for estimating the energy-storage capacity of a conventional air-independent system

При определении полной энергоемкости E (кВт·ч) неатомной воздухонезависимой энергетической установки при эксплуатации ПО в подводном положении полагается, что суммарная энергоемкость складывается из энергоемкости, необходимой для обеспечения заданного спектра основных ходовых

режимов (полный, крейсерский, малозумный), и энергоемкости общекорабельных потребителей.

Аналитически это записывается в виде следующей формулы:

$$E = E_{\text{пх}} + E_{\text{кх}} + E_{\text{мх}} + E_{\text{сн}} = N_{\text{пх}} \cdot T_{\text{пх}} + N_{\text{кх}} \cdot T_{\text{кх}} + N_{\text{мх}} \cdot T_{\text{мх}} + E_{\text{сн}}, \quad (1)$$

где

$E_{\text{пх}}$ (кВт·ч) – энергоемкость, необходимая для обеспечения полного хода;

$E_{\text{кх}}$ (кВт·ч) – энергоемкость, необходимая для обеспечения крейсерского хода;

$E_{\text{мх}}$ (кВт·ч) – энергоемкость, необходимая для обеспечения малозумного хода;

$E_{\text{сн}}$ (кВт·ч) – энергоемкость, необходимая для обеспечения общекорабельных потребителей (системы жизнеобеспечения, оружие и др., включая собственные нужды ЭУ);

$N_{\text{пх}}, N_{\text{кх}}, N_{\text{мх}}$ – мощности полного, крейсерского и малозумного хода;

$T_{\text{пх}}, T_{\text{кх}}, T_{\text{мх}}$ – продолжительность полного, крейсерского и малозумного хода ПО.

В общем случае необходимый уровень мощности для обеспечения различных ходовых режимов ПО зависит от архитектурно-компоновочного облика подводного объекта и параметров его движительного комплекса, и на предварительных стадиях проектирования этот уровень может быть представлен в виде степенной зависимости между мощностью и скоростью движения. В данной работе частичные значения мощностей на крейсерских и малозумных ходах определяются в предположении традиционной кубической зависимости между скоростью и мощностью по формулам

$$N_{\text{кх}} = N_{\text{пх}} (v_{\text{кх}} / v_{\text{пх}})^3; \quad (2)$$

$$N_{\text{мх}} = N_{\text{пх}} (v_{\text{мх}} / v_{\text{пх}})^3; \quad (3)$$

Соответственно, $v_{\text{пх}}, v_{\text{кх}}, v_{\text{мх}}$ – скорость полного, крейсерского и малозумного хода в подводном положении (уз).

Энергоемкость общекорабельных нужд представляется в виде суммы энергоемкостей $E_{\text{сн},i}$ на различных режимах эксплуатации, равных сумме произведений $N_{\text{сн},i} \cdot T_i$, где $N_{\text{сн},i}$ – средняя мощность i -го общекорабельного потребителя (кВт), а T_i – продолжительность его функционирования (ч):

$$E_{\text{сн}} = \sum_i E_{\text{сн},i} = \sum_i (N_{\text{сн},i} \cdot T_i). \quad (4)$$

При этом $T_i \leq T$, (5)

T – непрерывная подводная автономность.

Подставляя выражения (2), (3) и (4) в формулу (1), получаем зависимость для расчета необходимой энергоемкости для обеспечения заданного спектра режимов функционирования подводного объекта в подводном положении:

$$E = N_{\text{пк}} \cdot T_{\text{пк}} + N_{\text{пк}} (v_{\text{кк}} / v_{\text{пк}})^3 T_{\text{кк}} + N_{\text{пк}} (v_{\text{мк}} / v_{\text{пк}})^3 T_{\text{мк}} + \sum_i (N_{\text{сн},i} \cdot T_i). \quad (6)$$

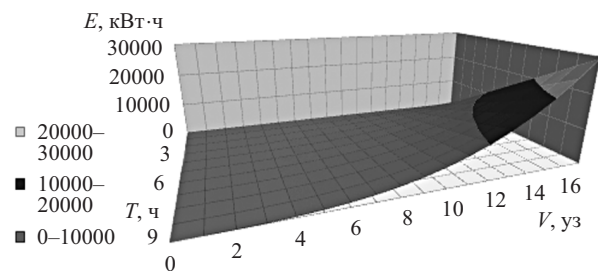


Рис. 1. Значение энергоемкости для обеспечения полного хода

Fig. 1. Energy capacity required for full-speed mode

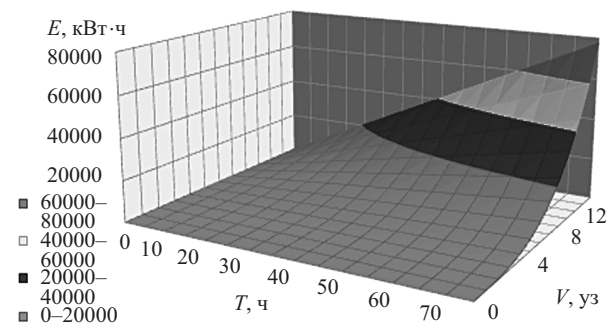


Рис. 2. Значение энергоемкости для обеспечения крейсерского режима

Fig. 2. Energy capacity required for cruising mode

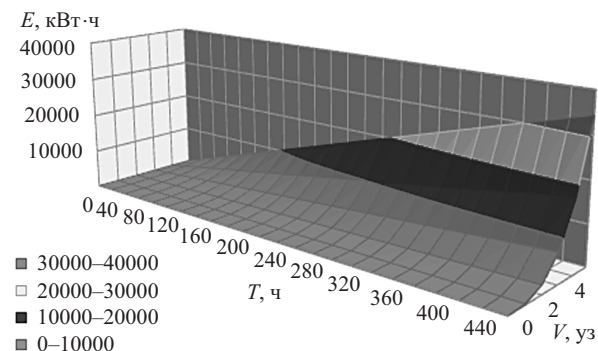


Рис. 3. Значение энергоемкости для обеспечения малозумного хода

Fig. 3. Energy capacity required for silent mode

Таким образом, энергоемкость аналитически выражается в виде функции (6), зависящей от следующих параметров: $N_{\text{пк}}$, $v_{\text{пк}}$, $v_{\text{кк}}$, $v_{\text{мк}}$, $T_{\text{пк}}$, $T_{\text{кк}}$, $T_{\text{мк}}$ и $E_{\text{сн}}$.

Заданная непрерывная подводная автономность T складывается из времени полного, крейсерского и малозумного хода и времени нахождения ПО в подводном положении при неработающей гребной установке T_0 (ч):

$$T = T_{\text{пк}} + T_{\text{кк}} + T_{\text{мк}} + T_0. \quad (7)$$

Представленные аналитические зависимости (6), (7) могут быть использованы при выборе требуемого варианта обеспечения заданного режима эксплуатации подводного объекта.

Соотношение (6) допускает также решение обратной задачи, а именно возможность при заданной необходимой энергоемкости (E_0) выявить допустимую область изменений варьируемых параметров. Например, если предположить, что для конкретного варианта известны значения мощности и скорости полного подводного хода, непрерывной подводной автономности и энергоемкость общекорабельных потребителей, то получаем

$$E_0 = N_{\text{пк}} \cdot T_{\text{пк}} + N_{\text{пк}} (v_{\text{кк}} / v_{\text{пк}})^3 T_{\text{кк}} + N_{\text{пк}} (v_{\text{мк}} / v_{\text{пк}})^3 T_{\text{мк}} + \sum_i (N_{\text{сн},i} \cdot T_i). \quad (8)$$

Переносим в левую часть равенства (8) значения величин, задаваемые при рассмотрении конкретного варианта, получаем

$$E_0 - N_{\text{пк}} \cdot T_{\text{пк}} - E_{\text{сн}} = N_{\text{пк}} (v_{\text{кк}} / v_{\text{пк}})^3 T_{\text{кк}} + N_{\text{пк}} (v_{\text{мк}} / v_{\text{пк}})^3 T_{\text{мк}}. \quad (9)$$

Поверхность, определенная соотношением (9), является граничной, разделяющей всю область изменения ($v_{\text{кк}}$, $v_{\text{мк}}$) и ($T_{\text{кк}}$, $T_{\text{мк}}$) на две подобласти:

$$E < E_0 \text{ и } E > E_0.$$

На основании изложенного выше, последовательность проведения численных расчетов энергоемкости может быть представлена следующим образом:

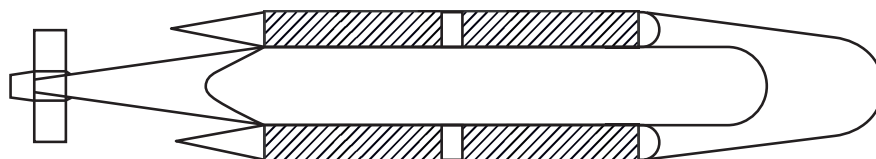
1. Задаются исходные данные рассматриваемого варианта эксплуатации ПО, включающие:
 - а) Постоянные (фиксированные для конкретного варианта ПО) требования:
 - мощность ЭУ для обеспечения максимального хода ПО, кВт;
 - мощность ЭУ для обеспечения собственных нужд ПО и ЭУ, кВт;

- максимальная скорость подводного хода, уз;
 - непрерывная подводная автономность, ч;
 - время движения полным ходом, ч;
 - мощности общекорабельных потребителей (кВт) и продолжительности их работы (ч).
- б) Варьируемые параметры:
- диапазон изменения продолжительности крейсерского хода, ч;
 - диапазон изменения продолжительности малошумного хода, ч;
 - диапазон изменения скорости крейсерского хода, уз;
 - диапазон изменения скорости малошумного хода, уз.
2. По формулам (6) и (7) строится поверхность изменения суммарной энергоемкости в рассматриваемом диапазоне изменения параметров.
3. По формуле (9) определяется граничная поверхность, выбор варьируемых параметров на которой обеспечивает достижение требуемого значения энергоемкости E_0 .

Процедура проведения вариантных расчетов по формулам (6) и (7) достаточно легко автоматизируется, в том числе посредством использования стандартных компьютерных программ (например, редактора Excel). Пример графического изображения отдельных компонентов, входящих в формулу (8), представлен на рис. 1–3.

Рис. 4. Принципиальная архитектурно-компоновочная схема подводного объекта

Fig. 4. Schematic layout plan of submarine



Пример расчета массогабаритных характеристик ВНЭУ неатомной подводной лодки с литий-ионной аккумуляторной батареей

Case study: Calculation of weight and size characteristics for a conventional AIP with Li-Ion battery

В качестве примера для оценки ожидаемых величин характеристик электроэнергетической системы, создаваемой на базе ВНЭУ с литий-ионной аккумуляторной батареей, рассмотрена ВНЭУ перспективного подводного объекта – одновалной ПЛ с тактико-техническими параметрами, близкими к параметрам зарубежных неатомных ПЛ с воздушнезависимой энергетикой [1] (ВНЭУ с ЭХГ – Германия, ВНЭУ с двигателем Стирлинга – Швеция, ВНЭУ с паротурбинной установкой – Франция). При этом предполагалось, что литий-ионная АБ со всеми обслуживающими системами комплектуется в отдельных прочных капсулах, размещаемых либо в прочном корпусе, либо между прочным и легким корпусами ПЛ (рис. 4).

Параметры прочных капсул при компоновке между прочным и легким корпусами, предназначенных для размещения ЛИАБ, приведены в табл. 1.

Основные требования к электроэнергетической системе ПЛ содержат следующие положения.

Таблица 1. Размеры прочной капсулы

Table 1. Size of pressure capsule

Параметр	Размерность	Значение
Наружный диаметр цилиндрической части	м	3,5
Высота внутреннего набора	м	0,2
Внутренний «полезный» диаметр цилиндрической части	м	3,1
Длина	м	17
Внутренний «полезный» объем	м ³	128
Количество капсул для размещения ЛИАБ	шт.	4
Общий внутренний «полезный» объем	м ³	512

Электроэнергетическая установка ПЛ комбинированная включает:

- традиционную дизель-генераторную установку, размещаемую в основном прочном контуре, для обеспечения надводных ходов, режимов работы дизеля под водой (РДП), режимов зарядки АБ;
- электроаккумуляторную установку с ЛИАБ, номинальная энергоемкость которой выбирается из условия обеспечения всех режимов эксплуатации ПО в подводном движении в зависимости от оговариваемого в техническом задании (ТЗ) распределения подводных ходовых режимов, соответствующих им потребных мощностей и непрерывной подводной автономности;
- ЛИАБ комплектуется со всеми обслуживающими системами в прочных капсулах.

Для рассматриваемого примера заданы следующие исходные данные:

- непрерывная подводная автономность – 21 сут. (504 ч);
- мощность гребного двигателя – 4000 л.с. (2941 кВт);
- скорость полного подводного хода – 17 уз, продолжительность за поход варьируется в диапазоне 2–8 ч;
- скорость при движении к месту патрулирования и при возвращении в базу (крейсерская скорость) варьируется в диапазоне 8–12 уз, продолжительность за поход – в диапазоне 50–76 ч;
- скорость в режиме патрулирования (малошумная скорость) варьируется в диапазоне 3–5 уз, продолжительность за поход – в диапазоне 420–450 ч.

Специалисты фирмы Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS) разработали новые концепции и решения, позволяющие создать крупногабаритные литий-ионные батареи для использования на ПО. Совместно с германским производителем ак-

кумуляторов – фирмой GAIA – разработан крупногабаритный литий-ионный аккумулятор номинальной емкостью 485 А·ч, на основе которого была создана АБ для использования на ПО.

После всесторонних исследований на испытательном стенде фирмы TKMS шесть АБ были установлены для испытаний на катамаран Planet Solar. Суммарная удельная энергия установленных АБ составляла более 1,1 МВт·ч, что сопоставимо с емкостью АБ на неатомных ПО. Батареи продемонстрировали безопасную и надежную работу в различных условиях [3].

В Российской Федерации, в соответствии с рекламной информацией [2, 4], освоено производство ЛИА номинальной емкостью 150–170 А·ч.

Очевидно, что параметры конкретных ЛИАБ по удельным характеристикам будут существенно отличаться от характеристик отдельных ЛИА, из которых они скомпонованы, в связи с появлением значительного количества коммутационных соединений и наличия обязательной системы защиты, контроля и управления.

При оценке массогабаритных показателей литий-ионной батареи рассматриваемого в работе ПО принимались следующие удельные характеристики:

- удельная энергоемкость массовая – 117 Вт·ч/кг;
- удельная энергоемкость объемная – 320 Вт·ч/дм³.

Оценка массогабаритных характеристик ЛИАБ, комплектуемых в заданных объемах ПО

Ниже представлены результаты оценки максимально достижимой величины энергоемкости ЛИАБ, которые могут быть размещены в прочных капсулах. При этом степень заполнения свободного объема принималась равной 0,6, и, таким образом,

Таблица 2. Максимальное значение энергоемкости ЛИАБ, комплектуемой в выделенных объемах подводных объектов

Table 2. Maximum storage capacity of Li-Ion battery fitting the allocated spaces on board of submersibles

Параметры	Размерность	Значение
Суммарный полезный объем для размещения ЛИАБ	м ³	306
Удельная весовая энергия ЛИАБ	Вт·ч/кг	117
Удельная объемная энергия ЛИАБ	Вт·ч/дм ³	320
Величина энергоемкости ЛИАБ, комплектуемой в капсулах ПО	кВт·ч	97820
Масса ЛИАБ, комплектуемой в капсулах ПО	т	836

суммарный полезный объем для размещения ЛИАБ равен 306 м^3 . Результаты оценки массогабаритных характеристик ЛИАБ, компокуемых в заданных объемах ПО, представлены в табл. 2.

Сопоставительный анализ ВНЭУ с ЛИАБ с другими возможными вариантами неатомных ВНЭУ для перспективных подводных объектов

Рассматриваемая система энергообеспечения ПО в подводном положении посредством ЛИАБ с точки зрения простоты эксплуатации выгодно отличается в лучшую сторону от всех существующих ВНЭУ, но требует значительных дополнительных объемов для размещения ЛИАБ. Поэтому представляет определенный интерес оценка массогабаритных характеристик других типов ВНЭУ по сравнению с ЛИАБ.

В качестве основного варианта при сравнении взят вариант с параметрами ВНЭУ с ЛИАБ: расчетное значение необходимой энергоемкости составляет $97820 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Масса ЛИАБ равна 836 т , она компокуется в объеме 306 м^3 (степень заполнения выделенных в боковых корпусах отсеков составляет $\sim 0,6$).

При выполнении оценок массогабаритных характеристик рассматриваемых ниже типов ВНЭУ принималось, что мощность полного подводного хода обеспечивается ЛИАБ, а максимальная мощность ВНЭУ, обеспечивающей крейсерский и малолучный ход, равна $\sim 600 \text{ кВт}$. Поэтому необходимая энергоемкость ВНЭУ для рассматриваемого режима эксплуатации ПО равняется (за вычетом энергоемкости полного хода $\sim 14700 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$), соответственно, $\sim 83100 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

На основании результатов проектно-исследовательских проработок [5] массогабаритные характеристики различных типов ВНЭУ для заданной энергоемкости оцениваются следующими величинами:

- ВНЭУ с ЭХГ системы водород-кислород при получении водорода путем конверсии дизельного топлива и системой утилизации отработавших продуктов сгорания на борту подводного объекта: суммарная масса – 226 т , необходимый объем – 245 м^3 ;
- ВНЭУ с ЭХГ системы водород-кислород при хранении водорода в интерметаллидах: суммарная масса – 387 т , необходимый объем – 150 м^3 ;
- ВНЭУ с двигателем внутреннего сгорания замкнутого цикла и системой утилизации отрабо-

тавших продуктов сгорания на борту подводного объекта: суммарная масса – $226,5 \text{ т}$, необходимый объем – $207,5 \text{ м}^3$;

- ВНЭУ с двигателем Стирлинга замкнутого цикла и системой утилизации отработавших продуктов сгорания на борту подводного объекта: суммарная масса – $196,1 \text{ т}$, необходимый объем – $208,6 \text{ м}^3$;
- ВНЭУ с газотурбинным агрегатом замкнутого цикла и системой утилизации отработавших продуктов сгорания на борту подводного объекта: суммарная масса – 241 т , необходимый объем – 280 м^3 .

Приведенные данные должны быть увеличены на $125,6 \text{ т}$ по массе и на 46 м^3 по объему – это соответствует параметрам ЛИАБ энергоемкостью $14700 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, посредством которой осуществляются форсажные подводные хода ПО в течение 5 ч .

Из рассмотрения этих данных следует, что использование других типов неатомной воздухонезависимой энергетики обеспечивает лучшие массовые и объемные характеристики по сравнению с ЛИАБ. Вместе с тем эти типы ВНЭУ обуславливают появление на ПО нового энергетического оборудования, опыт создания и эксплуатации которых на отечественных подводных лодках отсутствует (за исключением ВНЭУ с дизелем замкнутого цикла).

В то же время для рассматриваемого перспективного подводного объекта, в архитектуре которого предусмотрены соответствующие объемы для размещения ЛИАБ, энергоемкость которой достаточна для обеспечения заданного в ТЗ спектра ходовых режимов движения, позволяет говорить о необходимости продолжения работ по созданию ЛИАБ для отечественного подводного кораблестроения.

Заключение

Conclusion

1. ЛИАБ с позиций простоты управления и эксплуатационной надежности имеет несомненные преимущества по сравнению с другими возможными типами воздухонезависимой энергетики.
2. Дальнейшие работы по применению ЛИАБ на перспективных объектах должны быть направлены на создание демонстрационных образцов батарейного модуля, из которых может быть скомпонована ЛИАБ требуемой энергоемкости, с последующими всесторонними испытаниями в условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации.

Библиографический список

References

1. Jane's Fighting Ships. 2015–2016.
2. Аккумуляторная компания «Ригель». URL: http://www.rigel.ru/rigel/akk/1_i.html (дата обращения: 25.01.2018). [Website of JSC Rigel (storage battery company) URL:<http://www.rigel.ru/rigel/contact.html>. (in Russian)].
3. Разработка и интеграция литий-ионных батарей на подводных лодках // Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2014. № 70–71. С. 118–121. [Development and integration of Li-Ion batteries for submarines // Foreign press digest: Navy and ship-building. 2014. No. 70–71. P. 118–121. (in Russian)].
4. Ensol technology. URL: <http://www.polema.net/userfiles/files/Poroshki.pdf> (дата обращения: 26.01.2018).
5. Денисова М.Ш., Иванов Р.А., Копытов Ю.В. Тенденции развития энергетических установок подводных аппаратов // Материалы третьей Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики». СПб.: СПбГМТУ, 2014. С. 29.

Сведения об авторах

Арсеньев Юрий Николаевич, начальник отдела ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 386-69-53. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Иванов Роман Александрович, д.т.н., главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-65-24. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Копытов Юрий Васильевич, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

About the authors

Yuri N. Arseniev, Head of Department, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 386-69-53. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Roman A. Ivanov, D. Sc., Principal Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-65-24. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Yuri V. Kopytov, Leading Engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Поступила / Received: 01.03.18
Принята в печать / Accepted: 22.08.18
© Коллектив авторов, 2018