

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: taep@nntu.nnov.ru*

**В статье представлены варианты созданных и разрабатываемых воздухонезависимых энергетических установок (airindependentpower /AIP) подводных лодок. Показаны ориентировочные границы использования и примеры реализации воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок на основе тепловых двигателей (двигателей внутреннего сгорания, двигателей с внешним подводом теплоты, паротурбинные и газотурбинные энергетические установки), прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую (Polymer Electrolyte (or Proton Exchange Membrane) Fuel cells, Solid Oxide Fuel Cells, реформинг углеводородного топлива с получением водорода), аккумуляторных батарей высокой емкости, высокометаллизированного топлива и «термитных смесей». Указаны примеры реализации различных технологий в подводном кораблестроении и компании, проводящие научно-исследовательские работы по созданию данных технологий. Приведены основные особенности работы энергоустановок, их достоинства и недостатки.**

**Ключевые слова:** воздухонезависимая энергетическая установка (ВНЭУ), подводная лодка, энергетическая установка, виды топлива, энергия.

## COMPARATIVE REVIEW AND ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF AIRINDEPENDENT POWER INSTALLATIONS OF VARIOUS DESIGNS

Romanov A.D., Tchernyshov E.A., Romanov E.A.

*The Nizhny Novgorod state technical university of R.E. Alekseev, Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Minin St. 24, e-mail: taep@nntu.nnov.ru*

**Options of the created and developed airindependent power installations (airindependent power/AIP) of submarines are presented in article. Approximate borders of use and examples of realization of airindependent power installations of submarines on the basis of thermal engines (internal combustion engines, engines with an external supply of warmth, paroturbinary and gas-turbine power installations), direct transformation of chemical energy of fuel in electric (Polymer Electrolyte (or Proton Exchange Membrane) of Fuel cells, Solid Oxide Fuel Cells, a reforming of hydrocarbonic fuel with receiving hydrogen), storage batteries of the high capacity, the high-metallized fuel and "thermite mixes" are shown. Examples of realization of various technologies in underwater shipbuilding and the companies which are carrying out research works on creation of these technologies are specified. The main features of work of power installations their merits and demerits are given.**

**Keywords:** airindependent power installation (AIP), submarine, types of fuel, energy.

Энергетическая установка неатомной подводной лодки (ПЛ) представляет собой тяжелую, до 30 % массы, и объемную, до 50 % от водоизмещения, конструкцию. Однако классическая дизель-электрическая установка работает не эффективно, в подводном положении не используется дизельная установка и запас углеводородного топлива, в надводном, если не реализован режим полного электродвижения, становятся «не нужными» аккумуляторные батареи. Поэтому с момента первого появления подводных лодок предлагались различные типы тепловых «единичных двигателей», они развивались по следующим направлениям [1, 3]:

- Аккумуляция теплоты (уксусно-кислый натрий, жидкий металл).

- Паротурбинные установки замкнутого и открытого цикла: горение металлов или углеводородного топлива с применением в качестве окислителя перекиси водорода (цикл Вальтера).
- Двигатели внутреннего сгорания: открытого цикла («У», «Почтовый», ЕД-ВВД, Kreislauf), замкнутого цикла (применение водорода и кислорода, РЕДО, ЕД-ИВР, ЕД-ХПИ), с применением в качестве окислителя перекиси водорода (Х-1, ПВК), с применением твердого источника кислорода (надперекись натрия).

На рис. 1 и 2 Приведены ориентировочные границы применимости энергетических установок и примеры реализации с указанием проекта ПЛ.

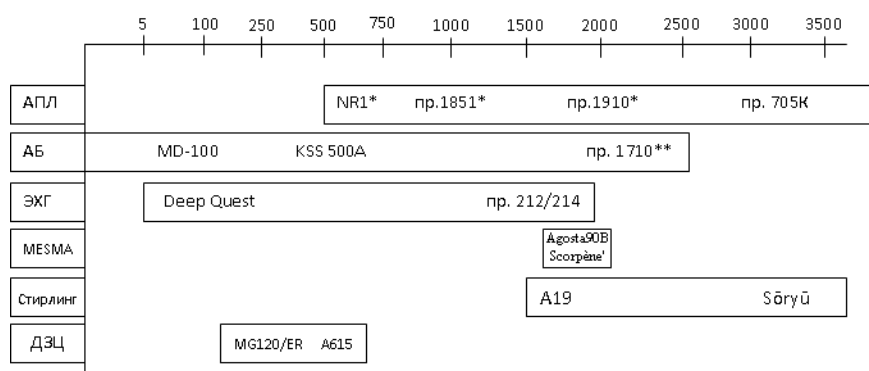


Рис. 1. Диапазон применения различных энергетических установок на ПЛ

\* – ПЛ без установленного вооружения.

\*\* – экспериментальная ПЛ лаборатория.

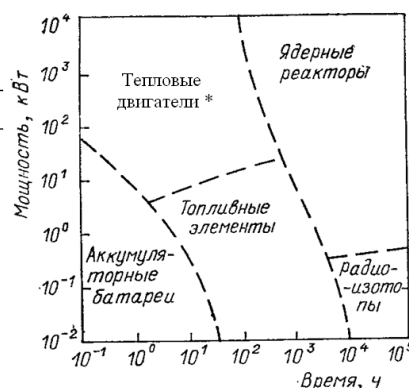


Рис. 2. Диаграммы мощности и продолжительности работы различных источников тока [9]

Знаком \* отмечен диапазон, рассмотренный в [9] отдельно.

Из рис. 1 видно, что фактически самые крупные ПЛ с аккумуляторными батареями крупнее ПЛ, оснащенных ядерной энергетической установкой. Однако это не мешает развиваться ПЛ с другими типами ЭУ. Можно привести пример торпед, все они при сравнимых габаритах оснащены различными типами ЭУ.

В настоящее время разрабатываются и внедряются энергоустановки на основе:

- Тепловых двигателей: двигатели с внешним подводом теплоты (Стирлинга), дизель по замкнутому циклу, паровые турбины замкнутого цикла, газотурбинных установок замкнутого цикла с использованием различных комбинаций высокометаллизированного топлива и окислителя.
- Прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую (топливные элементы), включая конверсию/реформинг углеводородного топлива и гидротермальное окисление металла, с получением водорода, используемого в ЭХГ.
- Аккумуляторных батарей высокой емкости, без подзарядки в море.
- Малогабаритных атомных энергоустановок, включая вспомогательные.

Практически для всех энергетических установок принят универсальный окислитель – кислород. Это связано с относительной простотой его получения, из воздуха, и обработанностью систем его хранения, в большинстве случаев – криогенное хранение.

Рассмотрим особенности различных воздухонезависимых энергетических установок.

### **1. ЭУ на основе тепловых двигателей**

Все эти принципиально разные по конструкции установки объединяет применяемое топливо (жидкие углеводороды) и механическое преобразование химической энергии топлива в механическую, а затем в электрическую. К тому же жидкое углеводородное топливо имеет преимущество по хранению, транспортировке. Применение топливно-балластных цистерн и возможность дозаправки в море значительно увеличивают возможный радиус действия. Данные конструкции могут использовать в качестве окислителя атмосферный воздух в режиме «работа двигателей под водой» (РДП / Schnorchel).

#### **1.1. ЭУ на основе дизелей по замкнутому циклу (ДЗЦ, closed-cyclediesel, CCD)**

Данные системы наиболее распространены, некоторые ДЗЦ базируются на опыте эксплуатации дизельных двигателей. Первыми проектами стали ПЛ Бертена и Джевецкого, после второй мировой войны в СССР серийно строились ПЛ с ДЗЦ (А615). Их технологическим преимуществом является использование «стандартных» дизельных двигателей, то есть меньшая стоимость и упрощение обучения экипажа. Однако сложной устранимая высокая шумность дизельного двигателя ограничивает развитие данной технологии. ЭУ на основе дизель по замкнутому циклу отличаются между собой конструктивно, но принцип действия аналогичен: из продуктов сгорания / выхлопных газов удаляется  $\text{CO}_2$ , при сгорании 1 кг дизельного топлива образуется 3,19 кг  $\text{CO}_2$ , нуждающегося в утилизации, например: растворением в морской воде (Argo / ЕД-ИВР), поглощением твердыми продуктами (ЕД-ХПИ, надперекись натрия, хлорид натрия) или вымораживанием, затем газовая смесь обогащается кислородом и направляется в цилиндры.

В настоящее время компания RDM (Голландия) предлагает энергетическую установку SPECTRE (Submarine Power for Extended Continuous Trialand Range Enhancement) на основе дизеля, работающего по замкнутому циклу. Аналогичные работы выполнены компаниями COSMOS (Италия), CDSS (Великобритания) и TNSW (Германия). Однако серийно ПЛ с данными ЭУ не строятся, за исключением малых ПЛ [10].

#### **1.2. ЭУ на основе двигателя с внешним подводом тепла (Стирлинга)**

От всех известных преобразователей энергии прямого цикла, которые могут использоваться в составе анаэробных установок, двигатели Стирлинга выгодно отличаются рядом качеств, которые обуславливают перспективу их применения на неатомных ПЛ: малозумность в работе из-за отсутствия взрывных процессов и достаточно плавного

протекания рабочего цикла, что влияет на акустическую скрытность ПЛ; высокий к.п.д., высокое давление продуктов сгорания, позволяющее удалять продукты горения за борт на глубинах до 200 м без компрессора, возможность использования различных типов углеводородного топлива.

Недостатками являются: высокая стоимость; сложность, высокая технологическая емкость конструкции; низкое значение агрегатной мощности реализовано 75 кВт, вероятно, наиболее достигнутая 600 кВт. Примерами реализации данной ЭУ являются проекты А-17, А-19, Imp. Oyashio, возможно Type 041 и 043.

### **1.3. Паровая турбина ЭУ замкнутого цикла**

В настоящее время паровые турбины замкнутого цикла MESMA (Moduled'EnergieSous-MarineAutonome) внедряются на ПЛ проекта Agosta90В и Scorpene. По данным концерна «DCN», выходная мощность ЭУ "MESMA" составляет 200 кВт. Установка производит тепловую энергию путем сжигания газообразной смеси этилового спирта и кислорода в первичном контуре теплообменника. Вторичный контур представляет собой паровую турбину, которая приводит в действие высокоскоростной турбогенератор. В настоящее время в Бразилии в г. Итагуаи идет строительство верфи для производства подводных лодок (MetalStructuresManufacturingUnit). Данная верфь обладает всем необходимым для производства корпусных секций в рамках программы кораблестроения PROSUB. Головная ПЛ должна приступить к испытаниями в 2016 году.

Аналогом данной разработки в России можно назвать исследования ОАО «СПМБМ Малахит» и НПВП «Турбокон».

### **1.4. Газотурбинная установка ЭУ замкнутого цикла**

Разрабатываются различные варианты оснащения ПЛ газотурбинной установкой замкнутого цикла. Газотурбинный двигатель (ГТД) – это уравновешенная тепловая машина, обладающая меньшими по сравнению с ДВС вибрационными характеристиками, шумность – слабое место ГТД, однако акустические возмущения имеют высокую частоту, что возможно снизить за счет шумоизоляции. В России НПО «Сатурн» имеет задел по малогабаритным ГТД для современных летательных аппаратов военного назначения. На сегодняшний день ОАО СПМБМ «Малахит», совместно с НПО «Сатурн» и НПО «Гелиймаш», выполнили расчетные исследования созданию ВНЭУ с ГТД [4].

## **2. ЭУ на основе топливных элементов**

Топливный элемент – электрохимическое устройство, которое преобразовывает химическую энергию топлива и окислителя в электрическую. Топливные элементы могут использовать ископаемое топливо (главным образом, природный газ или бензин) или непосредственно водород (в случае топливных элементов PEM).

Основные направления развития топливных элементов: Polymer Electrolyte (or Proton Exchange Membrane) Fuel cells PEM/PEMFC, Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC), Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC), Solid Oxide Fuel Cells (SOFC).

### **2.1. ЭУ на основе Proton Exchange Membrane (PEM)**

Низкотемпературные ЭХГ имеют удельную мощность порядка 65 Вт/кг, ресурс порядка 5000 ч. При этом удельный расход водорода от 0,045 – 0,048 кг/кВт\*ч, расход кислорода 0,36 – 0,38 кг/кВт\*ч. Топливные элементы BZM120 имеют мощность 120 кВт каждый и весят 900 кг с объема 500 литров. Композиция топлива водород + кислород с продуктами реакции вода являются теоретически лучшей композицией по энерговыделению на 1 г продуктов реакции и простоты утилизации продуктов реакции на ПЛ. Однако масса систем хранения водорода значительна, запас при криогенном хранении водорода не превышает 5 % от массы систем хранения, при газообразном около 3 % в адсорбированном виде в интерметаллидных соединениях. Высокая стоимость создания ЭУ и береговой инфраструктуры, технологические проблемы с хранением топлива, невозможность организации базирования ПЛ в недостаточно оборудованных пунктах существенно снижают мобильность и боевую устойчивость, так как уничтожение базы фактически делает невозможным применение ПЛ. Поэтому разрабатываются альтернативные варианты хранения водород содержащего топлива ( $\text{NH}_3$ , гидриды металлов, гидрореагирующее топливо) и вариантов получения водорода из него.

### **2.1. ЭУ на основе реформера метанола и PEM**

Метанол имеет меньшую теплоту сгорания, чем дизельное топливо, и более токсичен, однако его чистота позволяет применять его для реформеров. HDW разработала концепцию дизель-электрической подводной лодки, предназначенной для решения широкого круга задач в удаленных океанских (морских) зонах, пр. 216. Аналогичный проект разработан DCNS для пр. S-80A. Повышение скрытности и увеличение продолжительности автономных действий ПЛ намечается достигнуть благодаря применению комбинированной электроэнергетической установки, включающей четыре дизель-генератора, литий-ионные аккумуляторные батареи и электрохимические генераторы фирмы. В целях обеспечения работы последних планируется использовать бортовой генератор водорода с метанол-паровым реформером. Принцип действия генератора заключается в следующем: метанол смешивается с водой, испаряется и затем подается в реактор. Смесь метанол – вода преобразуется в насыщенную водородом газовую смесь, которая поступает в мембранный блок очистки. Основная часть водорода проходит через мембрану и далее в топливный элемент. Схема имеет преимущества перед PEM в части применяемого топлива, обеспечении большей дальности, за счет вспомогательного дизель-генератора и снижением уязвимости

береговой инфраструктуры. Однако требует дополнительные системы на борту ПЛ – реформинга и утилизации CO<sub>2</sub>.

### 2.3. ЭУ на основе Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

Solid Oxide Fuel Cell принадлежат группе высокотемпературных топливных элементов. Они работают при температурах до 1000 °С и могут использовать разнообразное топливо: газообразный водород или углеводороды (бензин, дизель, керосин), природный газ. Причем их особенностью является возможность применения топлива с меньшей степенью очистки, в частности по сере, в отличие от низкотемпературных топливных элементов где сера и СО отравляют катализатор. Другое преимущество состоит в том, что SOFC при работе выделяет CO<sub>2</sub> при высокой температуре. Что позволяет использоваться для повышения КПД микро газовую турбину, для производства электрической энергии или других вспомогательных нужд. Данные ЭУ разрабатываются различными компаниями, например, Wärtsilä.

Однако подобная система также требует утилизацию CO<sub>2</sub>.

### 3. ЭУ на основе аккумуляторной батареи без системы дозарядки в море

В настоящее время одним из конкурентов тепловым двигателям (ЭУ) являются оснащение ПЛ только аккумуляторной батареей большой емкости. Аналогичные конструкции применяются на подводных аппаратах. Теоретически наиболее простой тип энергетической установки, однако современные батареи имеют недостаточную емкость для обеспечения нахождения под водой продолжительное время (более 14 дней) при сравнительно высоком энергопотреблении (более 50 кВт\*ч). Традиционная свинцово-кислотная батарея (и др.) не удовлетворяет требованиям для этих целей, однако с появлением альтернативных технологий, таких как батареи Зебры Роллс-ройса или литий-ионный аккумулятор, это стало выполнимо, кроме того, разрабатываются другие типы АБ: серно-натриевые, натриево-серебрянные, натрий-никельхлоридные, литиево-хлорные, литиево-серебрянные, литий-полимерные, никель-металгидридные и др. [7]. Ориентировочная удельная емкость батарей представлена в таблице 1.

Таблица 1. Удельная массовая энергия различных типов аккумуляторных батарей

Тип батареи	Удельная емкость, Вт*ч/кг
Свинцово-кислотная	35-40
Никель-кадмиевая	35-38
Серебряно-цинковая	120
Зебра	160
Sodium Sulphide(NaS)	170
Lithium ion	110

Причем удельная энергоемкость батареи зависит от режима разрядки и может отличаться для свинцово-кислотных от 22 Вт\*ч/кг при часовом режиме разрядки до 55 Вт\*ч/кг при 1000 часовом режиме.

Для питания средств навигационной обстановки созданы батареи, которые имеют длительный период разряда, например, щелочной марганцево-цинковой электрохимической системы, но они имеют малую мощность.

#### **4. ЭУ на основе высокометаллизированного топлива**

В основном ведутся только научно-исследовательские работы по данному направлению. Достоинствами данной схемы является: высокая калорийность продуктов, взрыво/пожаробезопасность, возможность совместного или отдельного хранения продуктов без изменения их физико-химических свойств, продукты горения находятся в твердом состоянии, что облегчает систему утилизации. Существуют проекты с различными вариантами топлива и окислителя:  $Al + O_2$ ,  $Mg + CO_2$ ,  $Al + CrO_3/S/Fe_2O_3$ ,  $Li + CrO_3$ ,  $Li + SF_6$ , причем топливо и окислитель могут находиться как в твердом, так и в жидком / газообразном состоянии [3, 8]. Проекты значительно конструктивно отличаются. Камеры сгорания могут быть: прямоточными, циклонными, слоевыми, барботажными/погружными, поверхностное горение. Преобразование тепловой энергии может производиться в ГТУ ЗЦ, ПТУ ЗЦ, на основе двигателя с внешним подводом тепла.

В работе [3, с 112] указывается, что ЭУ на основе безгазового топлива может быть размещена в габаритах отсека существующих ПЛ, причем сравнительные оценки показали превосходство над базовым вариантом дизельной ПЛ. Однако практическое внедрение прошли только малые энергоустановки, например, в Advanced Lightweight Torpedo, данная ЭУ оснащена двигателем с циклом Ренкина и забортной водой в качестве теплоносителя, топливом является металлический литий, окислителем газообразный гексафторид серы.

#### **5. ЭУ на основе «термитных смесей»**

В основном разрабатываются малые и сверхмалые ЭУ, часть из которых применяется только для генерации тепла [2]. Данные ЭУ могут оснащаться аккумуляторами тепла, то есть время работы ЭУ значительно превышает время горения термитного заряда. В зарядах используют «окислители второго рода», эти соединения требуют так много тепла для выделения из них кислорода, что смеси их с органическими веществами не способны к горению. Следует отметить, что интерес представляет не общее количество кислорода, содержащееся в окислителе, а то количество его, которое расходуется на окисление горючего. Количество кислорода, отдаваемого используемыми твердыми окислителями, составляет не более 52 % от веса соединения.

#### **Выводы**

Сравнительный анализ производится на основе системы показателей качества и критериев эффективности [1, 5,6]. Оценка эффективности ЭУ представляет собой многокритериальную задачу с нелинейными целевыми функциями и ограничениями,

решаемые методами нелинейного программирования. В целом оценку эффективности внедрения той или иной технологии можно делать только на основе корректных исходных данных. Кроме выбора критериев сравнения, необходимо выбирать весовые характеристики критериев. Причем, кроме характеристик самой ЭУ (энергетические, надежности, экономические, уровни полей, например, интенсивность шумоизлучения, напряженности электромагнитного поля, концентраций отработанных веществ, выделяемых в атмосферу при работ, ремонтпригодность установки [1, 2, 5, 10]. Важно также учитывать стоимость создания и эксплуатации береговой инфраструктуры.

### Список литературы

1. Васильев В.А., Чернышов Е.А., Романов И.Д., Романова Е.А., Романов А.Д. История развития подводных лодок с воздухозависимыми энергоустановками в России и СССР // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 4. – С. 192-202.
2. Генкин А.Л. и др. Анаэробный источник теплоты на безгазовом топливе для аварийного обогрева водолазов // Судостроение. 2010. – № 2. – С. 36-38.
3. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухозависимые энергетические установки. – СПб.: Судостроение, 2006. – 424 с.
4. Замуков В. В., Сидоренко Д. В. Выбор воздухозависимой энергоустановки неатомных подводных лодок // Судостроение. – 2012. – № 4. – С. 29-33.
5. Замуков В.В., Сидоренко Д.В., Петров С.А. Состояние и перспективы развития воздухозависимых энергоустановок подводных лодок // Судостроение. – 2007. – № 5. – С. 39-42.
6. Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. – СПб.: Судостроение, 2001. – 264 с.
7. Никифоров Б.В. и др. Литий-ионные аккумуляторные батареи в качестве основных источников электроэнергии дизель-электрических подводных лодок // Судостроение. – 2010. – № 2. – С. 25-28.
8. Чернышов Е.А., Романов А.Д. Высокометаллизированное топливо на основе алюминия и его применение // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 24. – С. 69-73.
9. Ястребов В.С. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований. – Л.: Судостроение.
10. Dr Carlo Kopp. Air Independent Propulsion – now a necessity // Defence Today. – 12/2010.

**Рецензенты:**



Лоскутов А.Б., д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород.

Гущин В.Н., д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород.