

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
yuritsvet@mail.ru
Волков Александр Сергеевич —
инженер-конструктор.
ОАО «Инженерный центр судостроения»,
г. Санкт-Петербург
sanrock@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
Doctor of Engineering Science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
yuritsvet@mail.ru
Volkov Aleksandr Sergeevich —
design engineer.
ОАО «Inzhenernyj centr sudostroenija»,
St. Petersburg
sanrock@mail.ru

УДК 623.827

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

**РАЗВИТИЕ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ПОДВОДНЫХ ЛОДОК**

При всех неоспоримых плюсах атомных подводных лодок, таких как автономность, ограниченная только человеческим фактором, и превосходные боевые характеристики, атомные подводные лодки обходятся дорого не только в плане строительства, эксплуатации и утилизации, но и в плане создания инфраструктуры для обслуживания и утилизации атомных силовых установок. Не все страны могли позволить себе такие расходы, что обусловило необходимость активного развития рынка недорогих, быстро строящихся и экономически выгодных в эксплуатации неатомных подводных лодок, которые даже малому военно-морскому флоту дали бы возможность эффективно оборонять национальные воды. При этом эффективность применения неатомных подводных лодок в прибрежной и ближней морской зоне зачастую превосходит эффективность атомных подводных лодок. Одним из ключевых факторов успеха стала разработка и внедрение воздухонезависимых энергетических установок (ВНЭУ), которые позволяют значительно увеличить дальность подводного хода.

В статье показана история развития воздухонезависимых энергетических установок для подводных лодок. Приведены примеры реализации различных технологий в подводном кораблестроении и компании, проводящие научно-исследовательские работы по созданию данных технологий.

Ключевые слова: подводная лодка, воздухонезависимая энергетическая установка.

ПЕРВОЙ системой для вентиляции воздуха внутри подводной лодки (ПЛ) стал шнорхель (*snorkel*), который впервые был предложен английским ученым William Bourne в 1578 г. Одной из первых ПЛ, оснащенных шнорхелем, стала построенная в 1897 г. лодка «Argonaut». В 1927 г. голландец Wichers получил патент на «воздушную мачту» (*air mast*), предназначенную для вентиляции воздуха внутри ПЛ при нахождении на перископной глубине. Данной конструкцией были оснащены голландские ПЛ О19-О27. В немецком флоте первые ПЛ собственной разработки, оснащенные шнорхелем, появились в 1943 г. При этом шнорхель обеспечивал обновление воздуха только на перископной глубине, поэтому с момента первого появления ПЛ для увеличения дальности подводного хода предлагались различные типы «единых двигателей» [1].

С развитием двигателей внутреннего сгорания были разработаны проекты их использования в подводном положении. Так в 1901 — 1905 гг. француз Georg F. Jaubert запатентовал несколь-

ко вариантов энергетических установок «замкнутого цикла», включая системы с использованием чистого кислорода. В 1902 г. по его проекту началось строительство ПЛ типа Q37(Y), оснащенную двигателем внутреннего сгорания, работающим по замкнутому циклу (ДВС ЗЦ). ДВС ЗЦ планировалось установить на ПЛ типа «Guêre» (Q49 и Q50), которые однако не были достроены. В 1903 г. в Германии Paul Winand получил патент по ДВС ЗЦ на основе двухтактного дизеля. В 1905 г. компания *MAN Augsburg* совместно с *Linde* вели работы по применению кислород-азотной смеси в двигателях внутреннего сгорания [2].

В Российской империи С. К. Джевецкий создал ПЛ, на которой в качестве единственного двигателя использовались бензиновые двигатели. Строительство ПЛ «Почтовый», началось в 1906 г. и в 1908 г. она вошла в состав флота. С 1920-х гг. в Советском Союзе начались активные исследования в области «единых двигателей». Так В. К. Станкевич и М. Н. Кривов разработали энергоустановку на основе теплового аккумулятора с алюминиевым теплоносителем. Данная установка предполагалась к использованию для сверхмалой ПЛ. В дальнейшем прорабатывалась возможность оснащения данной установкой ПЛ типа «М».

М. А. Рудницкий предложил паротурбинную установку на основе сжигания гранулированного алюминия в среде кислорода, данный проект разрабатывался для ПЛ типа «Н» [3]. Также были разработаны единые установки на основе «унитарного» топлива (Е. Н. Гурфейн), применения водорода в ДВС ЗЦ (А. П. Пугач), паротурбинные установки замкнутого цикла и др. [4]. Однако направление ДВС ЗЦ с применением жидкого углеводородного топлива оказалось более перспективным.

В 1936 г. под руководством С. А. Базилевского была создана установка РЕДО (регенеративный единый двигатель особого назначения), в которой выхлопные газы очищались от примесей и влаги и, пополненные кислородом, направлялись во всасывающий коллектор дизеля. Избыток выхлопных газов сжимался и направлялся в баллоны. Б. Д. Златопольский предложил в 1936 г. установку ИВР (искусственный воздух с растворением углекислого газа). Углекислый газ удалялся из выхлопных газов в адсорбционной колонке с применением заборной воды. И. П. Янкевичем был предложен проект ЕД-ВВД (единый двигатель выхлоп в воду), который предусматривал отвод выхлопных газов через ступицу гребного винта. Под руководством В. С. Дмитриевского был разработан ЕД-ХПИ (единый двигатель с химпоглотителем известковым), в котором выхлопные газы направлялись в химические фильтры, где отделялся углекислый газ и окись углерода, после чего происходило обогащение смеси кислородом.

В Англии во время Второй мировой войны Francis Thomas Bacon работал над топливными элементами для британских ПЛ. Однако наибольших успехов достигли немецкие ученые, в частности Hellmuth Walter, который исследовал возможность применения перекиси водорода в качестве окислителя. В ходе Второй мировой войны были построены две ПЛ проекта Wa-201 и две ПЛ проекта Wk-202, кроме того были заложены ПЛ XVII В серии, которые находились в разной степени готовности к моменту окончания войны. Также в Германии велись работы по созданию ПЛ с единым двигателем внутреннего сгорания «Kreislauf» («круговорот»). Так, в 1944 г. на верфи фирмы *Deutsche Werke AG* заложили ПЛ U-798 XVII К серии, однако в феврале 1945 г. постройку ее приостановили. Кроме того, разрабатывался проект XXVII («Kreislauf-Seehund») с ДВС ЗЦ [2], [5].

Опыт внедрения ВНЭУ в СССР и России после 1945 г.

В 1946 г. в ЦКБ-18 начались работы по созданию опытной ПЛ проекта 615 с энергоустановкой ЕД-ХПИ, главный конструктор А. С. Кассаиер. Дальность непрерывного подводного плавания была соизмерима с дальностью плавания ПЛ проектов 613 и 611, и значительно превосходили ПЛ проекта 96. Всего были построены одна ПЛ проекта 615 и 29 ПЛ по проекту А615. Эксплуатация данных ПЛ сопровождалась рядом аварий, в том числе — гибелью ПЛ. В связи с активным развитием атомных ПЛ проект ЕД-ХПИ был закрыт [6]. На базе проекта А615 в 1954 – 1955 гг. был разработан технический проект 637, в энергоустановке поглощение

выхлопного углекислого газа и обогащение его кислородом осуществлялось с помощью твердого гранулированного вещества — надперекиси натрия (Продукт Б-2). Также была разработана ВНЭУ по циклу академика Е. А. Чудакова с использованием в качестве окислителя перекиси водорода, которая имела наименование Продукт 030, или ПВК (перекись водорода концентрированная). В надводном положении дизель мог работать по обычному циклу с использованием атмосферного воздуха. В ходе технических проработок данная ВНЭУ предлагалась к использованию в различных проектах ПЛ [7].

На основании материалов немецкого конструкторского бюро *Glückauf* под руководством А. А. Антипина был разработан проект 617 — ПЛ с парогазотурбинной установкой (ПГТУ). Мощность ПГТУ зависела от глубины погружения, так как с увеличением глубины возрастали затраты на работу компрессора, удалявшего за борт углекислый газ. Летом 1952 г. начались испытания ПЛ С-99 проекта 617. В 1959 г. на ней произошла авария, после которой ПЛ не восстанавливалась. Параллельно с разработкой проекта 617 велись работы по более совершенным проектам ПЛ с ПГТУ: 617М, 635, 643, 647, которые не были реализованы в связи с началом активного строительства атомных ПЛ первого поколения.

ВНЭУ на основе газо-паротурбинных установок замкнутого цикла с использованием различных комбинаций высокометаллизированного топлива и окислителя были созданы в Военно-морском инженерном институте (ВМИИ) (военно-морской политехнический Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова») [8]. Кроме того, во ВМИИ под руководством Ф. З. Байбурина были выполнены различные научно-исследовательские работы, в частности НИР «Совершенствование эксплуатационных характеристик дизельных энергетических установок корабля», включая разработки технических решений при работе двигателя по замкнутому циклу [9] – [11]. Данные разработки могут быть применены не только как ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ, но и для сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу, которые целесообразно использовать при проектировании обычных энергетических установок.

С первой половины 1970-х гг. в ЦКБ МТ «Рубин» ведутся работы по созданию ВНЭУ с электрохимическим генератором (ЭХГ) [12]. Союзное конструкторское бюро котлостроения совместно с соисполнителями вело разработки ВНЭУ с ЭХГ для ПЛ проекта 865, глубоководного подводного аппарата «Поиск-6» и подводного средства движения «Сирена-К». В дальнейшем были разработаны энергоустановка большей мощности «Кристалл-27» со щелочным электролитом. Кроме того, в 1980-х гг. ЦКБ «Лазурит» разработало проект оснащения ПЛ проекта 613 ВНЭУ на основе ЭХГ мощностью 280 кВт (проект 613Э), разработчики — НПО «Квант» и НПО «Криогенмаш» [13], [14]. ФГУП РНЦ «Прикладная химия», ЦКБ МТ «Рубин» и ФГУП «Адмиралтейские верфи» создана установка непрерывного получения водорода методом гидротермального окисления порошков алюминия [15]. За рубежом подобные ВНЭУ получили название «полутопливные элементы» («*semi-fuel cells*»), в них используют алюминий или другой металл для получения водорода.

В настоящее время в ЦКБ МТ «Рубин» разработана ВНЭУ с риформингом дизельного топлива и ЭХГ, что позволяет избежать хранения водорода на борту ПЛ. Предполагается, что модуль ВНЭУ будет выполнен в виде отсека ПЛ с возможностью интеграции в ПЛ. На рис. 1 представлен опытный образец БТЭ-50К.

ОАО СПМБМ «Малахит» с середины 1990-х гг. проводило исследования ВНЭУ с тепловым двигателем по замкнутому циклу. Совместно с Военным инженерно-техническим университетом были созданы экспериментальные установки с дизельными двигателями мощностью 10 и 100 кВт по полузамкнутому циклу с удалением избыточных продуктов сгорания в атмосферу (рис. 2).

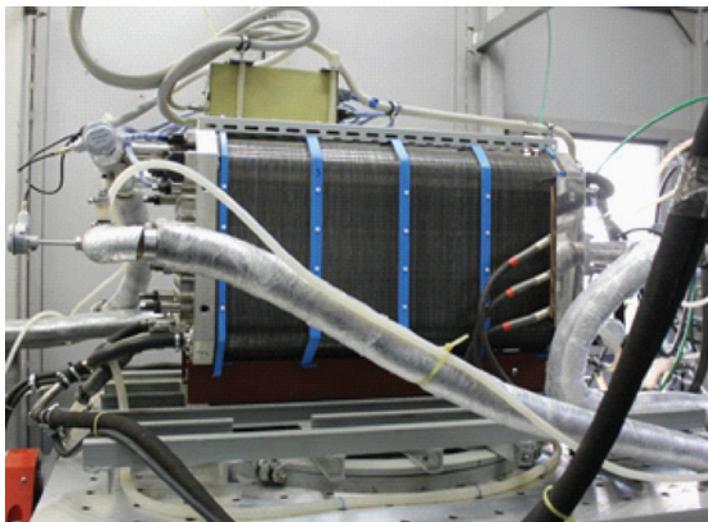


Рис. 1. Опытный образец БТЭ-50К на стенде

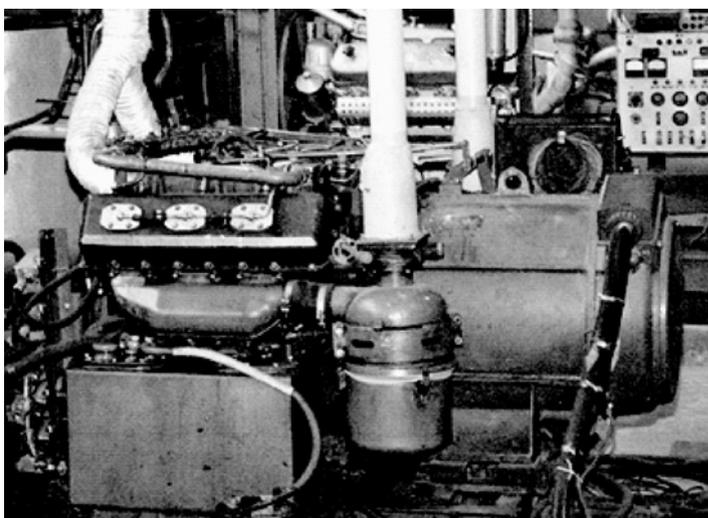


Рис. 2. Опытный образец ДВС ЗЦ на стенде [14]

Совместно с ЗАО «Турбокон» была разработана ВНЭУ с высокотемпературной паровой турбиной, работающей по замкнутому циклу. В настоящее время идет разработка проекта ВНЭУ с газотурбинным двигателем, работающим по замкнутому циклу (ГТД ЗЦ), который является дальнейшим развитием технологии дизель-генератора, работающего по замкнутому циклу [16].

Иностраный опыт создания ВНЭУ после Второй мировой войны

После окончания войны англичане подняли немецкую ПЛ U-1407, оснащенную ПГТУ Вальтера, она получила имя «Meteorite». В дальнейшем Великобритания построила две ПЛ с ПГТУ Вальтера — «Explorer» и «Excalibure». В ходе испытаний ПЛ выявились серьезные принципиальные недостатки. Одним из главных являлся значительный удельный расход перекиси водорода.

В США после окончания Второй мировой войны проводились работы по ПЛ с ВНЭУ на основе немецкой ПГТУ. В дальнейшем работы были переориентированы на ДВС ЗЦ, но с применением в качестве окислителя перекиси водорода [17]. Однако в дальнейшем, как в Англии, так и в США отказались от неатомных ПЛ для собственных флотов. Разработки ВНЭУ большой мощности велись ограниченно, так, например, компания *Perry Offshore* разработала ВНЭУ «Closed-Cycle Energy Source» (CCES) для аппарата доставки боевых пловцов.

Итальянская компания *Costruzione Motoscafi Sottomarini SpA (COS.MO.S)* с 1955 по 2003 гг. поставила на экспорт более 20 ПЛ, в том числе оборудованные ДВС ЗЦ. В настоящее время с использованием наработок *COS.MO.S* при участии *Davida Costa* чилийская компания *Vapor Industrial* ведет разработку ПЛ «Crocodile Clase 250», оборудованную ДВС ЗЦ. Подобные установки были разработаны также в компании *Mar.Ital*, их отличительной особенностью является тороидальная конструкция прочного корпуса (*gaseous oxygen Stored in the Toroidal pressure hull*). При этом в качестве хранилища газообразного кислорода выступают элементы прочного корпуса, внутри труб хранится кислород под давлением до 350 атм. Выхлопные газы закачивались в освобождающиеся от кислорода объемы тороидальных элементов корпуса. Экспериментальная ПЛ RH-X2 в 1978 — 1982 гг. проходила испытания для отработки ВНЭУ. Начиная с 1982 г. были построены ПЛ проектов IMI-35, CEE-22 и 3-GST9. Кроме того, были разработаны проекты LWT-27, 20-GST48 и др. [18], [19]. Штаб итальянских ВМС после ознакомления с проектами ПЛ и результатами испытаний, указал, что концепция GST заслуживает внимания, однако на вооружении данные ПЛ не принимались. Проявили интерес к данным ПЛ и ВМС США [20].

Компании *RDM* (Голландия), *CDSS* (Великобритания) и *TNSW* (ФРГ) разработали энергетическую установку «Submarine Power for Extended Continuous Trial and Range Enhancement» (SPECTRE) на основе ДВС ЗЦ. На рис. 3 представлена схема ВНЭУ «Thyssen Closed Cycle Diesel system». Кроме того, малые ПЛ с ДВС ЗЦ, например «Seepferd-KD», строились в разных странах, однако серийного выпуска не было.

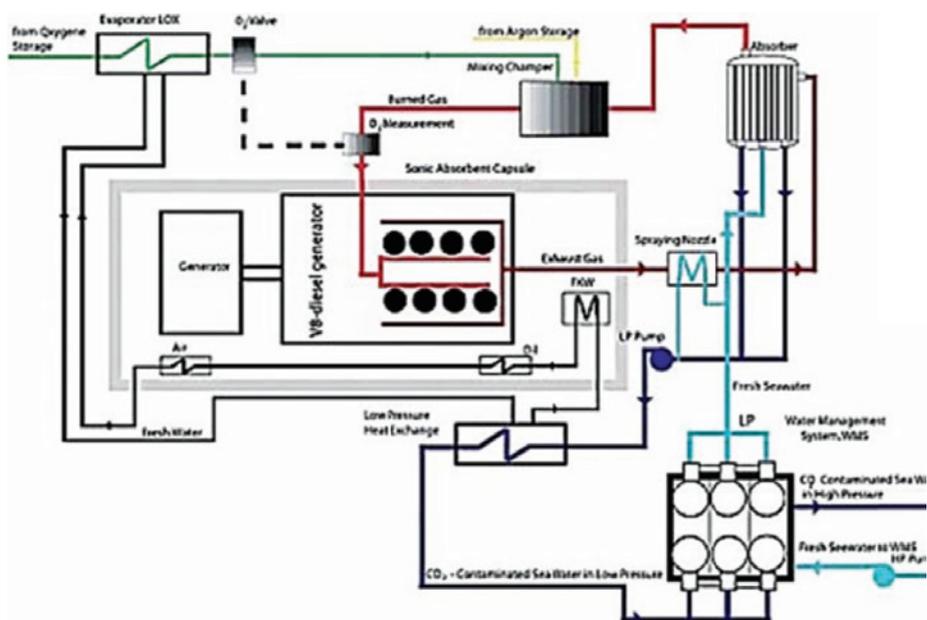


Рис. 3. «Thyssen Closed Cycle Diesel system»

ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ с применением в качестве окислителя перекиси водорода или кислорода также были созданы в Швеции [21]. Однако в дальнейшем для ВНЭУ ПЛ применялся в основном двигатель с внешним подводом тепла (двигатель Стирлинга). Первой ПЛ с двигателем Стирлинга, вероятно, стала французская «Saga» (1971 г.), на которой были установлены два двигателя Стирлинга произведенные *Swedish co. United Stirling*. В дальнейшем шведской компанией *Kockums* были впервые серийно внедрены ВНЭУ на основе двигателя Стирлинга. Так в 1988 г. головная ПЛ типа «Nankeen» была переоборудована под двигатели Стирлинга. ПЛ «Gotland» стали первыми серийными ПЛ с двигателями Стирлинга. Кроме того, данными ВНЭУ и их модификациями оснащены ПЛ Австралии («Collins») и Японии («Soryu» и др.).

В настоящее время активно развивается ВМФ Китая [22], и наибольшее распространение в Китае в качестве ВНЭУ получил двигатель Стирлинга. Так в 2007 г. Военно-морские силы Ки-

тайской Народной Республики приняли на вооружение проект Туре 041 «Yuan class», серийно оснащенный ВНЭУ. Кроме того, данной ВНЭУ оснащены нескольких ПЛ проекта Туре 039 различных модификаций. Это позволило оснастить ПЛ с ВНЭУ не только национальные ВМФ, но и выйти на внешний рынок. В частности Китаем планируется поставить в Пакистан восемь ПЛ проекта S20, также возможна поставка трех ПЛ Таиланду. Данные ПЛ являются экспортным вариантом проекта 039/041 и могут быть оборудованы ВНЭУ.

Французская компания *DCNS* [23], больше известная в России по универсальному десантному кораблю «Mistral», разработала ВНЭУ «Module D'Énergie Sous Marine Autonome» (MESMA) на основе паротурбинной установки замкнутого цикла (рис. 4). Установка производит тепловую энергию путем сжигания смеси спирта и кислорода в первичном контуре теплообменника, вторичным контуром является паровая турбина, которая приводит в действие высокоскоростной турбогенератор. Данной ВНЭУ оснащаются ПЛ «Agosta-90B» и «Scorpene».

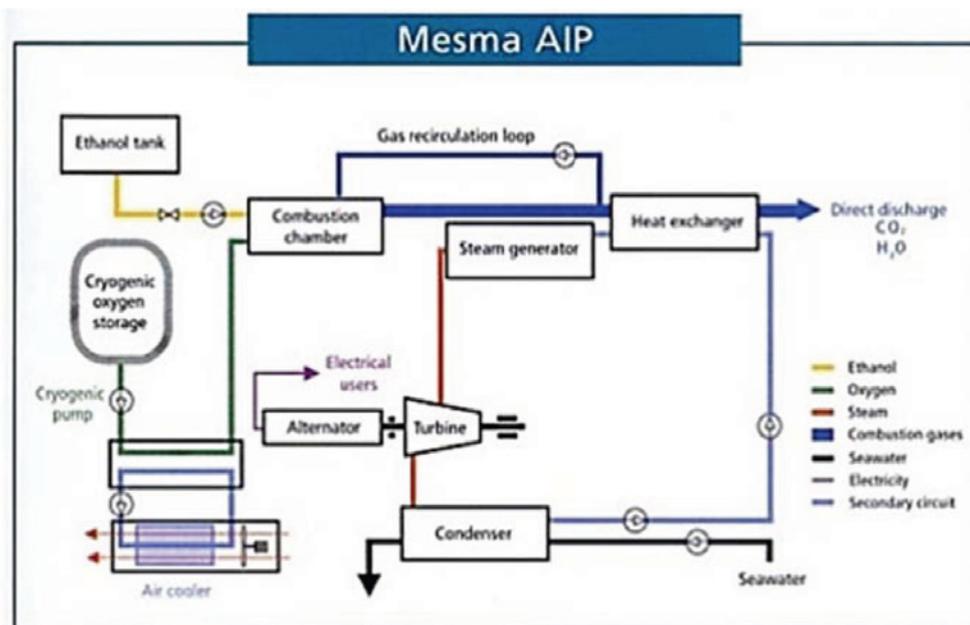


Рис. 4. Схема энергетической установки MESMA

Первая «Agosta-90B» для ВМС Пакистана была построена в Шербуре, там же началась постройка второй ПЛ, которая достраивалась уже в Карачи на верфях *Pakistan Naval Dockyard*. В 2009 г. компания *DCNS*, в рамках программы PROSUB (PROgrama de SUBmarinos), заключила контракт на постройку для Бразилии пяти ПЛ «SBR» (на базе «Scorpene», длиной до 75 м). Предполагается, что головная ПЛ должна приступить к испытаниям в 2016 г. Строительство лодок ведется предприятием *Itaguai Construcoes Navais SA* на верфи *Metal Structures Manufacturing Unit*. Также в настоящее время ведется строительство шести ПЛ «Scorpene» для Индии. Необходимо отметить, что в четырех случаях (Чили, Малайзия, Индия, Бразилия) проект «Scorpene» одержал верх над немецкими ПЛ проекта 214, оснащенных ВНЭУ на основе топливных элементов.

Первый топливный элемент был создан еще в 40-х гг. XIX в. Примерно с того же времени известен двигатель внутреннего сгорания, газовая турбина была изобретена еще в 1791 г. Однако до настоящего времени распространение топливных элементов незначительно по сравнению с тепловыми двигателями. Прорыв был достигнут в 1950-х гг. Так в Швеции по заказу *Swedish Navy* в 1964 г. компания *ASEA* изготовила демонстрационную энергоустановку на основе щелочного топливного элемента (*Alkaline Fuel Cells* или AFC) для ПЛ. Первым подводным аппаратом на топливных элементах стал «Deer Quest». Кроме того, различными компаниями и университетами были построены несколько десятков малых подводных аппаратов с ВНЭУ на основе топливных

элементов. В Германии в 1988 г. начались ходовые испытания подводной лодки «U-1» проекта 205, оборудованной ВНЭУ на основе AFC, 16 элементов по 5 кВт каждый. Причем в дальнейшем «U-1» была вновь переоборудована для испытания энергоустановки на основе ДВС ЗЦ. На основе сравнения результатов для дальнейшей работы был выбран вариант ВНЭУ на основе топливных элементов [24], [25].

AFC имеют особые требования к чистоте топлива и окислителя, которые значительно увеличивают сложность и стоимость эксплуатации. Поэтому в настоящее время в подводной технике применяют, в основном, топливные элементы с полимерной мембраной (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* или PEMFC) и твердооксидные топливные элементы (*Solid Oxide Fuel Cells* или SOFC). Так, в настоящее время наибольшее распространение в мире получили ПЛ с ВНЭУ на основе PEMFC производства *Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS)*, это ПЛ проектов 212, 214, 209 PN и др. Топливом для PEMFC является очищенный водород, при этом существуют технические сложности с организацией береговой инфраструктуры, в частности с получением и хранением водорода, что существенно снижает мобильность; кроме того, уничтожение топливозаправочного комплекса фактически делает невозможным применение ПЛ. Для решения этой проблемы разрабатываются ВНЭУ на основе риформера углеводородов [24], [25]. Схема имеет преимущества в части применяемого топлива и снижения уязвимости береговой инфраструктуры, однако требует дополнительные системы на борту ПЛ — риформинга и системы утилизации CO₂. В настоящее время компания *HDW* разработала ПЛ проекта 216/218SG, предназначенные для действия в удаленных океанских (морских) зонах. В конце 2013 г. Сингапур объявил о заключении контракта с немецкой компанией *TKMS* на закупку двух ПЛ проекта 218SG. ПЛ проекта 214 предполагаются к строительству в других странах. Так, в 2009 г. турецкое Министерство Обороны заключило соглашение с *HDW* о совместном производстве шести ПЛ. Эти ПЛ будут построены на *Gölcük Naval Shipyard* совместно с немецкими компаниями, но с максимальным объемом (до 80 %) местного оборудования. В дополнение к девяти построенным по немецкой лицензии ПЛ проекта 209/1200 Республика Корея планирует к 2020 г. построить девять ПЛ проекта 214 в рамках проекта KSS-2, после чего намерена принять на вооружение до шести ПЛ в рамках проекта KSS-3.

Аналогичные проекты разрабатываются также в других странах. В Канаде в 1980 гг. *Canadian Department of National Defense* начал разработку ВНЭУ мощностью 300 кВт, базирующейся на PEMFC, разработанной *Ballard Corp.* для ПЛ проекта «Oberon». Исследования были закончены в 1992 г., но внедрения не получили. В дальнейшем для ПЛ проекта «Victoria» (английские ПЛ проекта «Upholder») была разработана энергоустановка мощностью 250 кВт с использованием в качестве топлива метанола [26]. В Индии исследовательская лаборатория *Naval Materials Research Laboratory* разрабатывает ВНЭУ получением водорода на борту с помощью риформинга дизельного топлива.

Испанская *Navantia* (ранее — *Izar*) после расторжения соглашения с *DCNS* о совместном развитии программы «Scorpene» продвигает на рынок свой собственный проект S-80A с энергоустановкой на основе PEMFC мощностью 300 кВт с риформером этанола (рис. 5).

В марте 2004 г. Испания подписала контракт с государственной судостроительной компанией *Navantia* на поставку четырех неатомных ПЛ проекта S-80A, оснащенных ВНЭУ. Строительство началось в 2006 г. и продолжается до сих пор. Первоначально предполагалось, что первая ПЛ (S81 «Isaac Peral») будет построена к 2011 г., однако сложность проектировочных работ и связанные с ними технические проблемы, а также необходимость внесения ряда изменений привели к неоднократному переносу сроков сдачи ПЛ. В частности *Navantia* подписала с американской *Electric Boat*, которая принадлежит корпорации *General Dynamics*, контракт на перепроектирование подводных лодок проекта S80A. В результате сотрудничества испанская сторона рассчитывает избавиться от передела, возникшего при строительстве головной ПЛ «Isaac Peral».

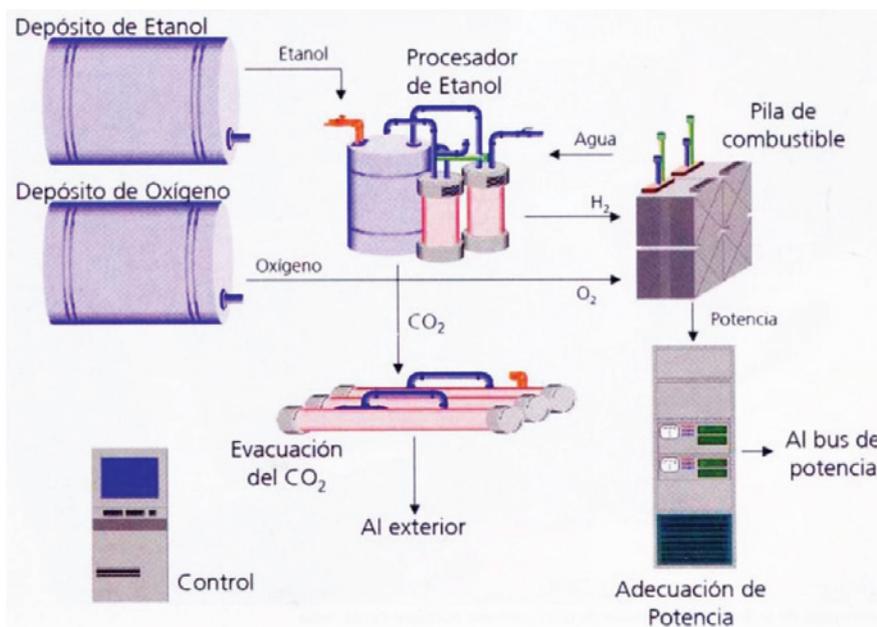


Рис. 5. Схема энергетической установки ПЛ проекта S-80A [27]

Другим вариантом применения углеводородного сырья в топливных элементах являются SOFC, которые работают при температурах более 700 °С. Причем их особенностью является возможность применения топлива с меньшей степенью очистки, в частности по сере. Также SOFC выделяют CO₂ при высокой температуре, это позволяет использовать турбину для производства электрической энергии и повышения КПД. Например компания BMT Defence Services (Великобритания) разработала проект ПЛ «Vidar-36» с ВНЭУ на основе SOFC [28].

В США в рамках государственных программ «U.S. Navy Ship Service Fuel Cell Program» и «U.S. Navy Advanced Fuel Cell Program» компаниями *Energy Research Corporation*, *Ballard*, *McDermott Technology, Inc.* были созданы энергетические установки на основе AFC, PEMFC и SOFC, использующие в качестве топлива водород или топливо JP-5, JP-8, F-76 (*Navy Distillate Fuel*). В настоящее время для наземной техники и необитаемых подводных аппаратов разработаны энергетические установки малой мощности, ориентированные на использование «единого топлива» НАТО [29].

Разработки ПЛ небольшого водоизмещения с атомной энергетической установкой

Перспективными источниками энергии считаются малогабаритные атомные энергоустановки (АЭУ) [30]. В США еще в 1969 г. был создан малогабаритный вариант АЭУ и построена ПЛ NR-1 (водоизмещение около 400 т), в СССР/России также построены малые ПЛ с АЭУ, например, проекта 1851 (водоизмещение около 550 т). Кроме того, был реализован проект оснащения неатомной ПЛ вспомогательной энергетической установкой на основе малого атомного реактора. В 1985 г. по проекту 615Э, разработанному ЦКБ «Лазурит», на заводе «Красное Сормово» было произведено переоборудование ПЛ проекта 651 с целью ее оснащения малогабаритной вспомогательной атомной установкой ВАУ-6 мощностью 600 кВт [31]. В США, Канаде и других странах также были разработаны малые энергетические установки, в том числе для применения для подводных объектов. При этом фактически малые ПЛ, оснащенные атомной установкой, сравнимы или меньше ПЛ ряда неатомных ПЛ [32]. Так, еще в 1959 г. в США построена ПЛ SSKN-597 «Tallibi» (надводное водоизмещение около 2200 т), в СССР построены с 1971 по 1981 гг. ПЛ проекта 705/705К (надводное водоизмещение около 2300 т). В настоящее время на вооружении Франции состоят ПЛ проекта «Rubis» (надводное водоизмещение около 2400 т). В настоящее время в Аргентине возможна реализация проекта оснащения недостроенной неатомной ПЛ проекта TR-1700 атомным реактором CAREM.

Заключение

Неатомные ПЛ, сравнительно недорогие по стоимости и экономичные в эксплуатации, могут позволить малому военно-морскому флоту эффективно оборонять национальные воды. Так, в марте 2010 г. в Желтом море торпеда, вероятно, выпущенная одной из северо-корейских ПЛ, потопила южно-корейский корвет «Чхонан», обладавший противолодочным вооружением.

В настоящее время оборудование подводных лодок ВНЭУ является одним из условий участия в конкурсах на поставку ПЛ [33]; кроме того, для большинства стран актуальной проблемой является оснащение собственного флота неатомными ПЛ с ВНЭУ. Причем различные страны решили одну и ту же задачу разными путями, и приоритетное направление развития ВНЭУ выбиралось исходя из уровня развития соответствующей отрасли гражданского энергомашиностроения [13], [16].

В результате данного обзора ВНЭУ ПЛ можно сделать вывод о том, что практически все ПЛ с ВНЭУ в настоящее время используют в качестве окислителя кислород, причем хранится он в жидком состоянии. Альтернативные окислители применяются, в основном, для необитаемых аппаратов с ВНЭУ и специальных энергетических установок [35], [36]. Большинство существующих в настоящее время и проектируемых подводных лодок с ВНЭУ используют в качестве топлива жидкие углеводороды [32] – [38]. Причем большинство ВНЭУ в настоящее время созданы на основе тепловых двигателей (СССР, Китай, Япония, Швеция, Франция). Попытки применения топливных элементов начались еще во время Второй мировой войны, но успешными они были только для малых обитаемых подводных аппаратов. Единственная страна, которая смогла серийно построить ПЛ с ВНЭУ с применением водорода в качестве топлива, это — Германия, но в ходе эксплуатации выяснилось, что данная технология имеет высокую стоимость и уязвимую береговую инфраструктуру. При этом ряд стран (Германия, Турция, Ю. Корея) продолжают строительство данных ПЛ. Перспективным направлением является создание ВНЭУ с ЭХГ с риформингом жидких углеводородов.

В целом, отличием ВНЭУ с ЭХГ от ВНЭУ с тепловым двигателем является отсутствие вращающегося генератора электрического тока. При этом системы удаления продуктов сгорания (разложения) дизельного горючего, состоящих, в основном, из углекислого газа, требуются для любого типа ВНЭУ, использующего углеводородное горючее.

В тот момент, когда СССР начал утилизацию ПЛ проекта А615, в разных странах начали строить малые ПЛ с ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ (например, «Crocodile Clase 250»), такие ПЛ проектируются и строятся и сейчас. При худших виброакустических характеристиках по сравнению с другими вариантами ВНЭУ данные установки все еще востребованы. Некоторые страны имеют на вооружении значительное количество малых ПЛ, в том числе — оснащенных ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ. Широкое использование коммерческих технологий для производства военной техники снижает стоимость жизненного цикла ПЛ. При этом стоимость средства поражения ПЛ, например торпеды Mk-48 «ADCAP», сопоставима со стоимостью малой ПЛ с ДВЦ ЗЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Laudeuf M.* Sous-marins / M. Laudeuf, H. Stroh. — Paris, 1923. — 424 p.
2. *Moller E.* The encyclopedia of U-boats: from 1904 to present day / E. Moller, W.Brack. — London: Greenhill Books, 2004. — 260 p.
3. *Морозов М. Э.* «Эски» в бою. Подводные лодки Маринеско, Щедрина, Лисина / М. Э. Морозов, К. Л. Кулагин. — М.: ЭКСМО, 2008. — 148 с.
4. *Морозов М. Э.* Советский подводный флот 1922 — 1945 гг. О подводных лодках и подводниках / М. Э. Морозов, К. Л. Кулагин. — М.: АСТ, 2006. — 877 с.
5. *Маринин А.* Единый двигатель для подводной лодки / А. Маринин // Двигатель. — 2005. — № 5. — С. 19–23.
6. *Морозов М. Э.* Последние «малютки» Советского Союза. ПЛ пр.96 и А615 / М. Э. Морозов, К. Л. Кулагин. — М.: Морская коллекция, 2010.

7. Широкопад А. Б. Советские подводные лодки послевоенной постройки / А. Б. Широкопад. — М.: Арсенал-пресс, 1997. — 208 с.
8. Дядик А. Н. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А. Н. Дядик, В. В. Замуков, В. А. Дядик. — СПб.: Судостроение, 2006. — 414 с.
9. Пат. 2015364 Российская Федерация, МПК F 02 В 47/00. Система для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / Байбури Ф. З., Рычков В. А.; заявитель: Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова; патентообладатель: Санкт-Петербург, Государственная морская академия имени адмирала С. О. Макарова. — № 4859236/06; заявл. 13.08.1990; опубл. 30.06.1994.
10. Пат. 2032085 Российская Федерация, МПК F 02 В 47/10. Устройство для очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания / Байбури Ф. З., Рычков В. А., Тюнин В. К.; заявитель: Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова; патентообладатель: Санкт-Петербург, Государственная морская академия имени адмирала С. О. Макарова. — № 4913348/06, заявл. 22.02.1991; опубл. 27.03.1995.
11. Пат. 1825886 СССР, МПК F 02 М 25/06. Способ очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / Байбури Ф. З., Рычков В. А.; заявитель: Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. — № 4904789, заявл. 25.01.1991; опубл. 07.07.1993.
12. Ченцов М. С. Концепция установки получения водорода риформингом дизельного топлива в составе атмосферонезависимой энергетической установки с электрохимическими генераторами для неатомной подводной лодки / М. С. Ченцов, В. С. Соколов, Н. С. Прохоров // Альтернативная энергетика и экология. — 2006. — № 11. — С. 39–46.
13. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.
14. Хотинский О. В. Развитие энергетических установок подводных лодок ВМФ России: дис. ... канд. техн. наук. — Владивосток. — 2003. — 233 с.
15. Автономные комбинированные энергоустановки с топливными элементами, работающие на продуктах гидротермального окисления алюминия / А. Л. Дмитриев, В. К. Иконников, А. И. Кириллов, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. — 2008. — № 11. — С. 10–16.
16. Замуков В. В. Перспективы создания воздухонезависимой энергоустановки для неатомных подводных лодок России / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Изобретательство. — 2014. — № 10. — С. 23–30.
17. Гусев А. Н. Подводные лодки специального назначения / А. Н. Гусев. — М.: Моркнига, 2013. — 224 с.
18. Кипов В. Итальянские подводные лодки с энергетическими установками замкнутого цикла / В. Кипов // Зарубежное военное обозрение. — 1990. — № 5. — С. 57–59.
19. Романов А. Д. Итальянские малые подводные лодки и подводные средства движения сухого типа / А. Д. Романов, Е. А. Чернышов, Е. А. Романова // Современные наукоемкие технологии. — 2014. — № 8. — С. 35–39.
20. Rechnitzer A. B. The Scientific Research Support Potential of the Submersible MARITALIA 3GST9: MPL technical memorandum / A. B. Rechnitzer. — San Diego: University of California, 1990. — 52 p.
21. Кириллов Н. Г. Перспективы развития судовой энергетики на основе машин Стирлинга / Н. Г. Кириллов // Морской флот. — 2002. — № 2. — С. 30–32.
22. Ведерников Ю. В. Красный дракон: современные военно-морские силы Китая / Ю. В. Ведерников // Флот Тихого океана. — 2007. — Вып. 3. — 140 с.
23. Барабанов М. Судостроительное объединение DCNS / М. Барабанов // Экспорт вооружений. — 2010. — № 2. — С. 51–64.
24. Fuel Cell Handbook. Department of Energy. Under Contract No. DE-AM26-99FT40575. — U.S., 2000. — 352 p.
25. Psoma A. Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production / A. Psoma, Gunter Sattler // Journal of Power Sources. — 2002. — № 106. — Pp. 381–383.
26. Oberon Class Submarine Occupational Hygiene Project / Final Report February. — 2006. — 111 p.
27. Valero J. Submarinos S-80 para la Armada Espanola / J. Valero // Fuerza Naval. — 2013. — № 4. — Pp. 72–79.
28. Binns S. D. Meeting the current challenge of designing high capability SSKS. / S. D. Binns // The UDT Pacific 2008 conference in Sydney, Australia. — 2008. — 17 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045482/BMTDSL-Designing-SSKS-Vidar-Confpaper-UDTPacific-Oct08.pdf> (дата обращения: 25.07.2015).

29. Романов А. Д. Развитие концепции «единого топлива» в странах НАТО / А. Д. Романов, И. Д. Романов, Е. А. Чернышов [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2014. — № 9. — С. 34–37.
30. Аналитический обзор по малым модульным реакторам // Атомный эксперт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://atomicexpert.com/sites/default/files/ae%20%234_obzor_0.pdf (дата обращения: 03.09.2015).
31. Иванов И. В. Большая ракетная подводная лодка пр. 651Э со вспомогательной атомной энергетической установкой (ВАУ-6) / И. В. Иванов, В. А. Полежаев // Судостроение. — 2008. — № 3. — С. 27–30.
32. Романов А. Д. Сравнительный обзор и оценка эффективности воздухонезависимых энергетических установок различных конструкций / А. Д. Романов, Е. А. Чернышов, Е. А. Романова // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 67–74.
33. Романова Е. А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок / Е. А. Романова, А. Д. Романов, Е. А. Чернышов // Вооружение и экономика. — 2015. — № 1 (30). — С. 99–105.
34. Luo N. $\text{NaBH}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ fuel cells for air independent power systems / N. Luo, G. H. Miley, K. J. Kim [etc.] // Journal of Power Sources. — 2008. — V. 185. — № 2. — Pp. 685–690.
35. Mendez A. Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: State of the art / A. Mendez, T. J. Leo, M. A. Herreros // Conference Proceedings Paper. — Energies «Whither Energy Conversion? Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions». — 2014. — 19 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sciforum.net/conference/ece-1/paper/2345> (дата обращения: 25.07.2015).
36. Шпак А. И. Анализ современного состояния и путей развития зарубежных неатомных подводных лодок / А. И. Шпак, Я. Н. Чуксин // Морской вестник. — 2004. — Специальный выпуск № 1(2). — С. 26–31.
37. Мозговой А. Подводные лодки в год водяного дракона / А. Мозговой // Национальная оборона. — 2012. — № 1. — С. 16–42.
38. Замуков В. В. Состояние и перспективы развития воздухонезависимых энергоустановок подводных лодок / В. В. Замуков, С. А. Петров, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2007. — № 5. — С. 39–42.

DEVELOPMENT OF AIRINDEPENDENT POWER STATIONS OF SUBMARINES

At all indisputable pluses of nuclear submarines, such as the autonomy limited only to a human factor and excellent fighting characteristics, nuclear submarines cost much not only in the construction plan, operation and utilization, but also in respect of creation of infrastructure for service and utilization of nuclear power plants. Not all countries were able to afford such expenses that caused need of active development of the market of inexpensive, quickly under construction and economic not nuclear submarines in operation which even would give to small navy the chance effectively to defend national waters. And efficiency of use of not nuclear submarines in a coastal and near sea zone reached level, and often surpasses, nuclear submarines. Development and deployment of airindependent power stations which allow to increase range of the underwater course considerably became one of key factors of success.

The history of development of airindependent power stations for submarines is shown in article. The examples of realization of various technologies in underwater shipbuilding and the company which are carrying out research works on creation of these technologies are specified.

Key words: submarine, airindependent power station.

REFERENCES

1. Laudeuf, M., and H. Stroh. *Sous-marins*. Paris, 1923.
2. Moller, Eberhard, and Werner Brack *The encyclopedia of U-boats from 1904 to present day*. London: Greenhill Books, 2004.
3. Morozov, M. Je., and K. L. Kulagin. «E»ski» v boyu. *Podvodnyye lodki Marinesko, SHCHedrina, Lisina*. M.: E'KSMO, 2008.
4. Morozov, M. Je., and K. L. Kulagin. *Sovetskiy podvodnyy flot 1922-1945 gg. O podvodnykh lodkakh i podvodnikakh*. M.: AST, 2006.
5. Marinin, A. «Edinyy dvigatel dlya podvodnoy lodki.» *Dvigatel 5* (2005): 19–23.
6. Morozov, M. Je., and K. L. Kulagin. *Poslednie «malyutki» Sovetskogo Soyuz. PL pr.96 i A615*. M.: Morskaya kolleksiya, 2010.

7. Shirokorad, A. B. *Sovetskie podvodnye lodki poslevoennoy postroyki*. M.: Arsenal-press, 1997.
8. Dyadik, A. N., V. V. Zamukov, and V. A. Dyadik. *Korabelnye vozdukhonezavisimye energeticheskie ustanovki*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
9. Bayburin, F. Z., and V. A. Rychkov. Sistema dlja ochistki otrabotavshih gazov dvigatelja vnutrennego sgoranija. Rossijskaja Federacija, assignee. Patent 2015364. 13 Aug. 1990.
10. Bajburin, F. Z., V. A. Rychkov, and V. K. Tyunin. Ustrojstvo dlja ochistki vyhlopnyh gazov dvigatelja vnutrennego sgoranija. Rossijskaja Federacija, assignee. Patent 2032085. 22 Feb. 1991.
11. Bajburin, F. Z., and V. A. Rychkov. Sposob ochistki otrabotavshih gazov dvigatelja vnutrennego sgoranija. Rossijskaja Federacija, assignee. Patent 1825886. 25 Jan. 1991.
12. Chentsov, M. S., V. S. Sokolov, and N. S. Prokhorov. "Concept of a Hydrogen Producing Plant Based on Diesel Fuel Reforming as Part of Air-Independent Plant (AIP) with Fuel Cells for a Non-Nuclear Submarine." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 11 (2006): 39–46.
13. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines." *Sudostroenie* 4 (2012): 29–33.
14. Hotinsky, O. V. *Razvitie jenergeticheskikh ustanovok podvodnyh lodok VMF Rossii: dis. ... kand. tehn. nauk*. Vladivostok, 2003.
15. Dmitriev, A. L., V. K. Ikonnikov, A. I. Kirillov, V. Ju. Ryzhkin, and E. A. Khodak. "Autonomous combined power plants with fuel cell which works on products of hydrothermal aluminium oxidation." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 11 (2008) :10–16.
16. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Prospects of creation of airindependent power installation for not nuclear submarines of Russia." *Izobretatelstvo* 10 (2014): 23–30.
17. Gusev, A. N. *Podvodnye lodki spetsialnogo naznachenija*. M.: Morkniga, 2013.
18. Kipov, B. "Italjanskije podvodnye lodki s energeticheskimi ustanovkami zamknutogo tsikla." *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* 5 (1990): 57–59.
19. Romanov, A. D., E. A. Chernyshov, and E. A. Romanova. "Italian small submarines and underwater means of movement of dry type." *Modern high technologies* 8 (2014): 35–39.
20. Rechnitzer Andreas B. *The Scientific Research Support Potential of the Submersible MARITALIA 3GST9: MPL technical memorandum*. San Diego. University of California, 1990.
21. Kirillov, N. G. "Perspektivy razvitiya sudovoy energetiki na osnove mashin Stirlinga." *International Maritime Journal The Morskoy Flot (Marine Fleet)* 2 (2002): 30–32.
22. Vedernikov, YU. V. *Krasnyy drakon: sovremennye voenno-morskie sily Kitaya: Flot Tikhogo okeana, Vypusk 3*. Vladivostok, 2007.
23. Barabanov, M. "DCNS: Company Profile." *«Eksport Vooruzhenij (Arms Exports)* 3 (2010): 51–64.
24. Fuel Cell Handbook. Department of Energy. Under Contract No. DE-AM26-99FT40575. U.S., 2000: 352 p.
25. Psoma, Angela, and Gunter Sattler. "Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production." *Journal of Power Sources* 106 (2002): 381–383.
26. Oberon Class Submarine Occupational Hygiene Project / Final Report February. 2006.
27. Valero, J. "Submarinos S-80 para la Armada Espanola." *Fuerza Naval* 4 (2013): 72–79.
28. Binns Simon D. "Meeting the current challenge of designing high capability SSKS." *The UDT Pacific 2008 conference in Sydney, Australia 2008*: 17 p. Web. 25 July 2015 <<http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045482/BMTDSL-Designing-SSKS-Vidar-Confpaper-UDTPacific-Oct08.pdf>>.
29. Romanov, A. D., I. D. Romanov, E. A. Chernyshov, and E. A. Romanova. "Development single fuel concept in NATO countries." *International journal of applied and fundamental research* 9 (2014): 34-37.
30. Analiticheskij obzor po malym modulnym reaktoram // Atomnyj jekspert. Web. 03 September 2015 <http://atomicexpert.com/sites/default/files/ae%20%234_obzor_0.pdf>.
31. Ivanov, I. V., and V. A. Polezhaev. "Ocean-going missile submarine, project 651Э, with auxiliary nuclear powerplant (BAY-6)." *Sudostroenie* 3 (2008): 27–30.
32. Romanov, A. D., E. A. Chernyshov, and E. A. Romanova. "Comparative review and assessment of efficiency of air independent power installations of various designs." *Modern problems of science and education* 6 (2013): 67-74.
33. Romanova, E. A., A. D. Romanov, and E. A. Chernyshov. "Assessment of relevance of development of airindependent power installations and export potential of not nuclear submarines." *Armament and economics* 1(30) (2015): 99–105.

34. Luo N., G. H. Miley, K. J. Kim, R. Burton, and X. Huang. "NaBH₄/H₂O₂ fuel cells for air independent power systems." *Journal of Power Sources* 185.2 (2008): 685–690.
35. Mendez Alejandro, Teresa J. Leo, and Miguel A. Herreros. "Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: State of the art." *Conference Proceedings Paper - Energies «Whither Energy Conversion? Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions»*. 2014: 19 p. Web. 25 July 2015 < <http://sciforum.net/conference/ece-1/paper/2345>>.
36. Shpak, A. I., and Ya. N. Chuksin. "Analiz sovremennogo sostoyaniya i putey razvitiya zarubezhnykh neatomnykh podvodnykh lodok." *Morskoy vestnik Spetsialnyy vypusk* 1(2) (2004): 26–31.
37. Mozgovoy, A. "Podvodnye lodki v god vodyanogo drakona." *Natsionalnaya oborona* 1 (2012): 16–42.
38. Zamukov, V. V., S. A. Petrov, and D. V. Sidorenkov. "State and prospects of development of air-independent power plants of submarines." *Sudostroenie* 5 (2007): 39–42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернышов Евгений Александрович —
доктор технических наук, профессор.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романова Елена Анатольевна — аспирант.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романов Алексей Дмитриевич — инженер.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексева
nil_st@nntu.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernyshov Evgeny Aleksandrovich —
Doctor of Engineering, professor.
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanova Elena Anatolievna — graduate student.
Nizhny Novgorod State Technical University n. a.
R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanov Aleksey Dmitrievich — engineer.
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru

УДК 621.431.074

А. П. Петров,
Г. Е. Живлюк

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Введение норм ИМО Tier III в 2016 г. требует снижения выбросов оксидов азота (NO_x) с отработавшими газами двигателей на 75 % по сравнению с нормами ИМО уровня Tier II. Сокращение выбросов может быть достигнуто лишь путем применения новых технологий для судовых дизельных двигателей. Для того чтобы контролировать выбросы, не ухудшая экономичности, эти технологии должны быть направлены на значительное улучшение параметров топливо- и воздухоснабжения двигателя.

Представленная работа сосредоточена на рассмотрении направлений применения и развития электронных технологий управления с целью создания дизелей с гибкими системами управления, обладающими такими достоинствами, которые позволят обеспечить соблюдение указанных международных норм. Эти направления были широко представлены на 25 – 27 Конгрессах Международного совета по двигателям внутреннего сгорания (СІМАС Congress). Показаны достижения в части разработки и применения традиционных (низкого давления) систем топливоподачи с электронным управлением процесса впрыска топлива в цилиндры двигателя и систем топливоподачи высокого давления более сложного исполнения. Рассмотрены предлагаемые технические аспекты реализации управления фазами газораспределения, рециркуляцией отработавших газов и агрегатами турбонаддува.

В каждом конкретном случае целесообразно использовать либо локальные способы управления рассмотренными технологиями, либо их сочетанием, т.е., используя комплексный подход.

Ключевые слова: дизель судовой, управление автоматическое, система управления электронная, блок управления электронный, топливоподача, впрыск топлива, воздухоснабжение, газотурбинный наддув, газораспределение, отработавшие газы, рециркуляция.