

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-133-138
УДК 62-63.002.8:629.5

Р.А. Иванов¹, Ю.В. Копытов¹, В.П. Струев²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

СУДОВЫЕ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является судовая система удаления или утилизации двуокиси углерода. Цель исследований – оценка современного состояния работ в области создания систем утилизации двуокиси углерода.

Материалы и методы. Выполнен анализ современного состояния работ, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, в области создания судовых систем утилизации двуокиси углерода, образующейся при сгорании углеводородного топлива в среде кислорода в тепловых двигателях замкнутого цикла.

Основные результаты. Определены системы удаления или размещения двуокиси углерода на борту подводных объектов, применение которых снижает или полностью исключает возможность образования химического следа подводных объектов, оснащенных воздухозависимой энергетикой с тепловыми двигателями замкнутого цикла.

Закключение. Указано, что в настоящее время не существует универсального способа отвода продуктов реакции углеводородного горючего и кислорода от воздухозависимых энергетических установок для подводного применения.

Ключевые слова: двуокись углерода, система утилизации, воздухозависимая энергетическая установка, подводная лодка, углеводородное топливо, кислород.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-133-138
UDC 62-63.002.8:629.5

R. Ivanov¹, Yu. Kopytov¹, V. Struev²

¹ Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

² National Research Center *Kurchatov Institute*, Moscow, Russia

MARINE UTILIZATION SYSTEMS FOR HYDROCARBON FUEL COMBUSTION PRODUCTS

Object and purpose of research. This paper studies marine system of CO₂ removal or utilization. The purpose of this study is to assess the state of the art in developments of marine CO₂ utilization systems.

Materials and methods. The study analyses current Russian and foreign publications about development of marine system for utilization of carbon dioxide produced by hydrocarbon fuel combustion in closed-cycle thermal engines.

Main results. This study identifies CO₂ removal or storage systems for underwater objects, capable of greatly mitigating or completely eliminating the chemical trail left by submarines with air-independent closed-cycle thermal engines.

Conclusion. The study points out that currently there is no universal method of combustion products removal from air-independent power plants of submarines.

Keywords: carbon dioxide, utilization system, air-independent power plant, submarine, hydrocarbon fuel, oxygen.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Иванов Р.А., Копытов Ю.В., Струев В.П. Судовые системы утилизации продуктов сгорания углеводородного топлива. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 133–138.

For citations: Ivanov R., Kopytov Yu., Struev V. Marine utilization systems for hydrocarbon fuel combustion products. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 133–138 (in Russian).

Введение

Introduction

Анализ отечественного и зарубежного опыта создания неатомной воздухонезависимой энергетики (ВНЭУ) показывает, что за исключением Германии, создавшей энергетическую установку (ЭУ) на основе электрохимических генераторов (ЭХГ) водородно-кислородного типа, другие страны ориентировались на применение различных тепловых двигателей, в которых традиционное дизельное топливо (Швеция, Япония) или этанол (Франция) сжигается в среде кислорода.

Одним из основных вопросов, вставших на пути внедрения подобной энергетики, является необходимость обеспечения удаления или утилизации на борту подводных объектов значительного количества отработавших газов сложного состава, образовавшихся в результате сгорания топлива при достаточно высоком уровне температур и состоящих в основном из двуокиси углерода. Аналогичная проблема возникает и в случае создания ВНЭУ с ЭХГ водородно-кислородного типа, в которой водород получается путем конверсии углеводородного топлива.

Первые работы в области удаления продуктов сгорания, датированные 1955 годом, можно найти в отчете ЦНИИ имени акад. А.Н. Крылова «Систематизация и расчетные исследования способов обработки и удаления избыточных продуктов сгорания из системы газопровода двигателя, работающего на замкнутом цикле в условиях машинных установок подводных лодок».

Целью настоящего сообщения является оценка современного состояния работ в области создания корабельных систем утилизации двуокиси углерода. Под термином «утилизация» условно понимается технологический процесс, обеспечивающий одну из следующих возможностей или их комбинацию:

- удаление двуокиси углерода в окружающее пространство;
- накопление и размещение в специальных системах на борту подводных объектов двуокиси углерода или продуктов ее взаимодействия с различными химическими реагентами.

Способы удаления двуокиси углерода в окружающую среду

Methods of CO₂ removal to the environment

Удаление за борт отработавших газов принципиально возможно осуществлять несколькими путями:

- посредством сброса в забортную воду, если давление отработавшего газа выше давления окружающей среды;
- использованием дополнительной системы, обеспечивающей сжатие газов до требуемого уровня давления, превышающего давление окружающей среды;
- использованием систем, предварительно растворяющих отработанные газы в морской воде с последующим ее выбросом за борт.

Удаление двуокиси углерода в составе отработавших газов

Регулируемый отбор отработавших охлажденных газов из контура рециркуляции и удаление их в забортную воду является наиболее простым способом отвода образовавшейся двуокиси углерода. Вместе с ней в забортную воду попадает плохо растворимый избыточный кислород, который содержится в рециркулирующих газах для поддержания условий полного сгорания углеводородного топлива. Таким образом, может теряться до 7,5 % запаса кислорода, величина которого, в основном, определяется продолжительностью работы двигателя под водой.

В случае применения специального компрессора для дополнительного сжатия отработавших газов, его мощность будет зависеть от глубины погружения ПЛ, от типа теплового двигателя и удельного расхода углеводородного топлива.

Например, при удалении необходимого количества отработавших газов от ВНЭУ с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на глубинах до 200 м мощность компрессора газоотбора оценивается величиной, равной 15 % от мощности двигателя.

Удаление двуокиси углерода в виде раствора в забортной воде

Двуокись углерода характеризуется высокой растворимостью в воде, в том числе и в морской. На использовании этого свойства двуокиси углерода основана система его удаления Water Deep Sea System (WMS) (рис. 1), разработанная британской фирмой Coswort Deep Sea System Ltd. (CDSS) [1, 2].

Работоспособность этой системы была подтверждена стендовыми испытаниями [2] с имитацией глубины погружения до 500 м, в том числе испытаниями в составе ВНЭУ с ДВС замкнутого цикла. Она потребляет ~ 15 % от мощности ДВС.

Система WMS может использоваться в составе ВНЭУ с любым типом теплового двигателя, отра-

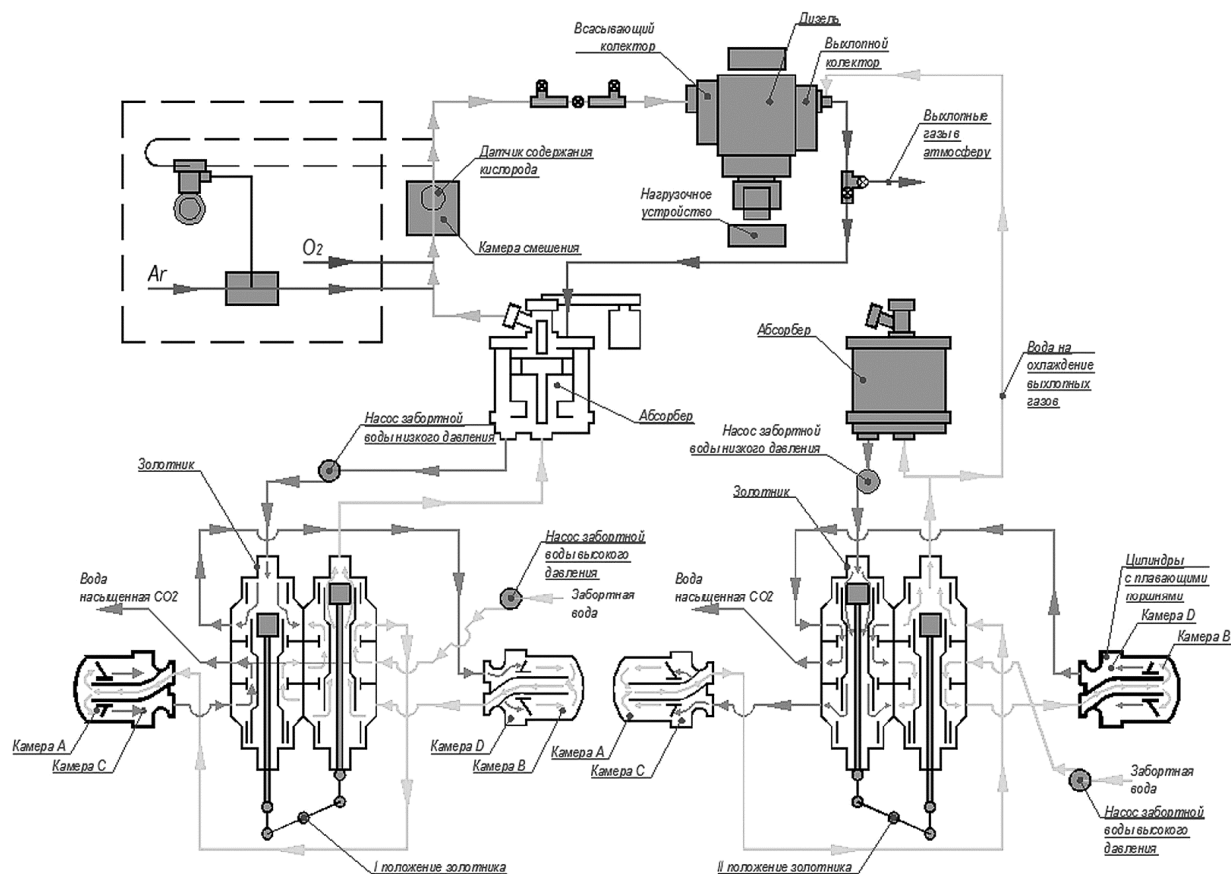


Рис. 1. Схема подачи морской воды в абсорбер и последующего вытеснения ее за борт посредством цилиндров с плавающими поршнями [2]

Fig. 1. Layout of sea water feed to the absorber with its subsequent removal overboard by means of cylinders with floating pistons [2]

ботавшие газы которого необходимо очищать от двуокиси углерода.

Работа ВНЭУ на углеводородном топливе и кислороде с удалением образующейся в процессе горения двуокиси углерода уменьшает нагрузку масс ПЛ.

Накопление двуокиси углерода на борту подводной лодки

CO₂ accumulation aboard submarine

К общим недостаткам перечисленных выше систем относится необходимость обеспечения бесследности ПЛ по химическому следу, а также необходимость компенсации положительной плавучести ПЛ. Размещение двуокиси углерода на борту ПЛ, образующейся при горении углеводо-

родного топлива, позволит исключить главный фактор, определяющий уменьшение нагрузки масс при работе ВНЭУ.

На основании анализа выполненных ранее исследований применительно к рассматриваемым объектам, размещение продуктов сгорания возможно, в том числе, путем применения способов хранения двуокиси углерода с изменением фазового состояния: в газообразном, химически связанном и жидком состоянии.

Накопление двуокиси углерода в газообразном состоянии

Накопление газообразной двуокиси углерода, необходимое количество которой отбирается из контура рециркуляции в составе смеси газов, отработавших в тепловом двигателе, не относится к числу удовлетворительных технических реше-

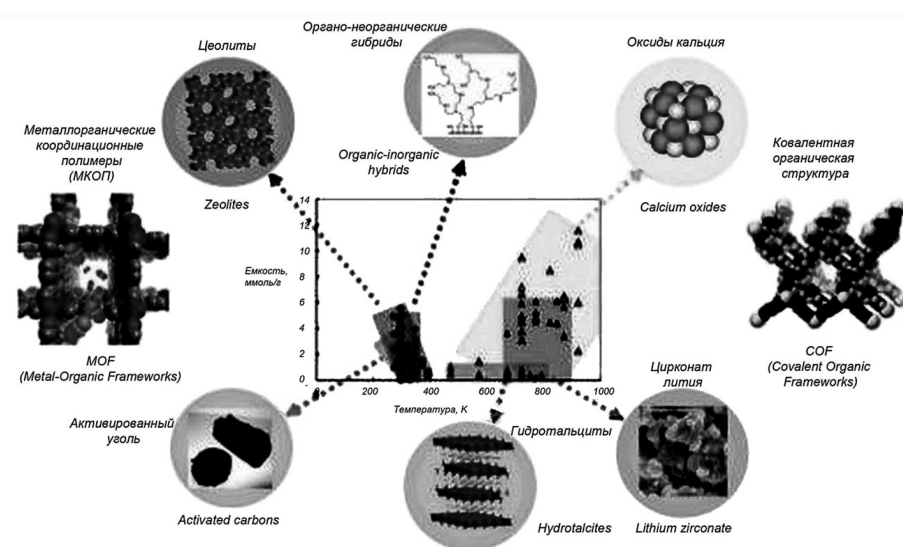


Рис. 2. Потенциальные способы и материалы адсорбции углекислого газа [4]

Fig. 2. Possible methods and materials for CO₂ adsorption [4]

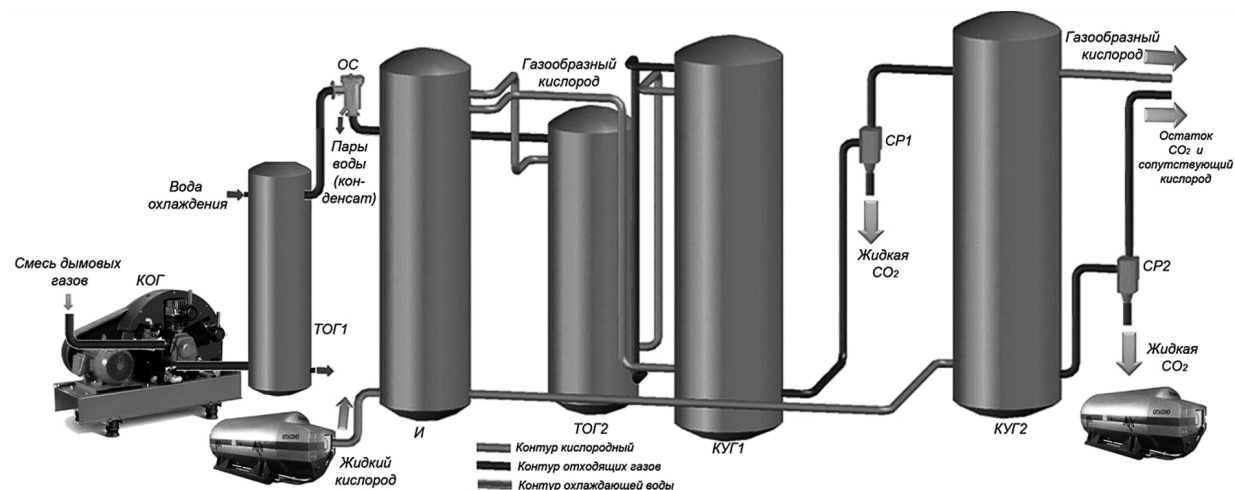


Рис. 3. Конструктивно-компоновочная схема системы утилизации двуокиси углерода: КОГ – компрессор отходящих газов; ОС – конденсатор-осушитель от паров воды; ТОГ1, ТОГ2 – теплообменники охлаждения отходящих газов; КУГ1, КУГ2 – конденсаторы углекислого газа; СР1, СР2 – сепараторы жидкой двуокиси углерода; И – испаритель жидкого кислорода

Fig. 3. Main components of CO₂ utilization system: КОГ – compressor of outgoing gases; ОС – condenser-separator of water vapours; ТОГ1, ТОГ2 – cooling heat exchangers of outgoing gases; КУГ1, КУГ2 – CO₂ condensers; СР1, СР2 – fluid CO₂ separators; И – fluid oxygen vaporizer

ний по причине значительной мощности компрессора газоотбора и больших объемов для хранения отбираемой смеси газов с двуокисью углерода. При изучении возможности использования освобождающихся объемов расходуемого кислорода, запасы которого содержатся в жидком состоянии под давлением на ПЛ, оказывается, что потребный объем для размещения компримируемой двуокиси углерода существенно превышает

освобождающийся объем кислородной емкости. В этом случае периодический сброс за борт части образовавшейся двуокиси углерода с приемом воды в балластные цистерны становится неминуемым.

В рассматриваемом варианте накопления двуокиси углерода также не исключается потеря части избыточного кислорода, содержащегося в отработавших газах.

Накопление двуокиси углерода в химически связанном состоянии

Что касается применения методов накопления и хранения двуокиси углерода в химически связанном состоянии, то ранее (для серийных отечественных ПЛ пр. 615 с дизелем замкнутого цикла) решение этой проблемы осуществлялось путем использования размещаемых на борту корабля специальных химических поглотителей [3], «емкость» которых выбиралась из условия обеспечения требуемой длительностью подводного хода ПЛ.

Сегодня имеется широкий спектр новых материалов, обеспечивающих возможность накопления и хранения CO_2 в связанном состоянии, часть из которых представлена на рис. 2 [4].

К числу этих материалов относятся различные цеолиты, а в перспективе координационные полимеры и другие материалы.

Накопление двуокиси углерода в жидком состоянии

Более экономичным и не требующим дополнительного базового обеспечения оказывается способ ожижения углекислого газа из продуктов сгорания с последующим хранением жидкой углекислоты на подводном объекте.

Принципиальная схема одного из вариантов системы с ожижением углекислоты представлена на рис. 3. Результаты расчетов изменения теплофизических параметров рабочих сред [5] подтвердили реальную возможность такого способа ожижения двуокиси углерода из продуктов сгорания дизельного топлива. Его применение в воздухонезависимых ЭУ на углеводородном горючем и кислороде после экспериментальной отработки позволит рациональным образом решить задачу отвода продуктов сгорания на ПЛ независимо от глубины их погружения.

Заключение

Conclusion

Следует констатировать, что для отечественного подводного кораблестроения решение вопроса, какому конкретному способу удаления или хранения на борту ПЛ двуокиси углерода следует отдать предпочтение, будет зависеть от тактико-технических характеристик, предъявляемых к разрабатываемому объекту. Потребуется выполнение дополнительных научно-исследовательских и опыт-

но-конструкторских работ, которые позволят уточнить реальные параметры подобных систем при использовании их на корабле.

Библиографический список

1. Батырев А.Н., Кошеверов В.Д., Лейкин О.Ю. Корабельные ядерные энергетические установки зарубежных стран. СПб.: Судостроение, 1994.
2. Гордеев В.А., Яковлев Г.В. Энергетические установки подводных лодок с дизелем замкнутого цикла // Судостроение за рубежом. 1991. № 12. С. 49–68.
3. Чекалов Ю.Н. Тепловые энергетические установки на замкнутом цикле для неатомных подводных лодок и аппаратов // Судостроение. 1995. № 4. С. 15–19.
4. Xiong R. Potential CO_2 Adsorbents. Chemical Engineering Science. 2003. № 58. P. 4377.
5. Иванов П.А., Сосков В.А. Типы и основные характеристики систем отвода продуктов реакции углеводородного горючего и кислорода из анаэробных энергоустановок для подводного применения // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005. Вып. 22(306). С. 57–62.

References

1. Batyrev A., Kosheverov V., Leikin O. Marine nuclear power plants of foreign countries. St. Petersburg: Sudostroyeniye, 1994 (in Russian).
2. Gordeev V., Yakovlev G. Power plants of submarines with closed-cycle diesel engines // Sudostroyeniye za rubezhom (Naval Engineers Journal). 1991. No. 12. P. 49–68 (in Russian).
3. Chekalov Yu. Closed-cycle thermal power plants for conventional submarines and submersibles // Sudostroyeniye. 1995. No. 4. P. 15–19 (in Russian).
4. Xiong R. Potential CO_2 Adsorbents. Chemical Engineering Science. 2003. № 58. P. 4377.
5. Ivanov R., Soskov V. Types and main parameters of combustion products from air-independent power plants of underwater objects // Transactions of KSRI. 2005. Issue 22(306). P. 57–62 (in Russian).

Сведения об авторах

Иванов Роман Александрович, д.т.н., профессор, 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.

Струев Вячеслав Петрович, д.ф.-м.н., профессор, заместитель руководителя Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, НИЦ «Курчатовский институт». Адрес: 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1. Тел.: 8 (812) 274-16-05. E-mail: struev_vp@nrcri.ru.

About the authors

Roman A. Ivanov, D. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskov-

skoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-65-24. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Yury V. Kopytov, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: 4_otd@ksrc.ru.

Vyacheslav P. Struev, Dr. Sci. (Phys. & Math.), Prof., Deputy Head of Kurchatov Complex of Transport Nuclear Power Technologies, NRC Kurchatov Institute. Address: 1, Akademika Kurchatova Square, Moscow, Russia, post code 123182. Tel.: 8 (812) 274-16-05. E-mail: struev_vp@nrcri.ru.

Поступила / Received: 16.10.18
Принята в печать / Accepted: 07.11.18
© Коллектив авторов, 2018