

УДК 629.122:621.352

**В.М. Горбов, М.А. Карпов***Национальный университет кораблестроения, Украина*

## КОНЦЕПЦИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ

*Предложена концепция судовых энергетических установок, работающих на природном газе и дизельном топливе, с электрохимическими генераторами на основе расплавно-карбонатных и твердооксидных топливных элементов. Рассмотрены основные принципы и методы конверсии углеводородного топлива. Разработаны методы утилизации вторичных энергетических ресурсов в судовой электрохимической энергоустановке с целью повышения ее эффективности и приведены схемные решения. Показаны возможности сопряжения основной судовой энергетической установки с электрохимической энергоустановкой.*

**Ключевые слова:** судовой энергетической установка, электрохимическая энергоустановка, электрохимический генератор, расплавно-карбонатный топливный элемент, твердооксидный топливный элемент, риформер, конверсия.

### 1. Постановка проблемы

В настоящее время направления эволюции судовой энергетики продиктованы нормативными и законодательными актами, которые регламентируют содержание вредных веществ в уходящих газах (Конвенция MARPOL 73/78, нормы Tier и др.) [1]. Этот факт приводит к необходимости разработки альтернативных схемных решений в судовой энергетической установке (СЭУ). Одним из способов уменьшения выбросов и увеличения эффективности СЭУ является применение электрохимических генераторов (ЭХГ) [2]. Разработка схемных решений СЭУ с различными типами ЭХГ и адаптация их к работе на определенном виде топлива являются важными задачами на стадии предпроектных решений.

### 2. Анализ последних исследований и публикаций

Вопросу внедрения ЭХГ на основе топливных элементов (ТЭ) на морской транспорт посвящено множество публикаций и исследований. Ведущие производители и судоходные компании, такие как Wärtsilä, MTU, Eidesvik и Wallenius уже эксплуатируют суда, в состав СЭУ которых входят экспериментальные электрохимические энергоустановки (ЭХЭУ) [3, 4]:

– судно для обслуживания газодобывающих платформ «Viking Lady» с ЭХГ на основе расплавно-карбонатных ТЭ (РКТЭ) мощностью 320 кВт, который отработал более 7000 часов в условиях Северного моря;

– судно для перевозки автомобилей «Undine» с ЭХГ на основе твердооксидных ТЭ (ТОТЭ) мощностью 20 кВт в составе вспомогательной электростанции.

Эти ЭХЭУ проходят тестовые испытания в качестве вспомогательных источников электрической энергии и имеют полную автономность относительно основной СЭУ. Разработка концепции и схемных решений СЭУ с интегрированной ЭХЭУ представляет собой сложную задачу из-за практически полного отсутствия необходимой информации.

### 3. Цель статьи

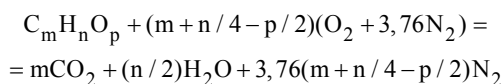
Формирование концепции СЭУ с ЭХГ, работающей на природном газе (ПГ) или дизельном топливе (ДТ) с использованием энергоресурсов основной СЭУ и утилизации вторичной энергии ЭХГ судовыми потребителями.

### 4. Изложение основного материала

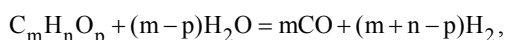
ПГ и ДТ является одними из основных судовых топлив, однако, они не могут быть использованы непосредственно в ТЭ. Топливом для ЭХГ служит водород или синтез-газ, полученный при термохимическом разложении углеводородного топлива – риформинге. В результате многоступенчатой кислородной и/или паровой конверсии можно получать водородосодержащий газ с объемной долей водорода до 80%, остальное – преимущественно углекислый газ. Кроме того, ПГ и ДТ содержат примеси серы, которые в свою очередь могут вызвать отравление катализаторов риформера на различных этапах конверсии топлива, а также отравление катализаторов на электродах ТЭ.

Основной целью риформинга углеводородного топлива для применения в энергоустановках с ЭХГ является обеспечение максимального вы-

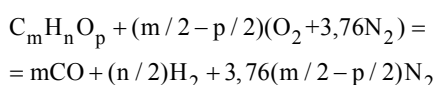
хода водорода из исходного топлива, что требует создания определенных условий процесса, способствующих препятствию реакции образования воды и диоксида углерода, то есть экзотермической реакции полного окисления [5]:



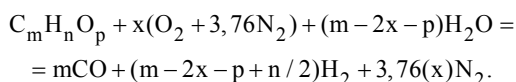
Газогенерация может проходить либо по эндотермическому механизму – паровой риформинг (ПР) [5]:



либо по экзо- или автотермическому: – парциальное окисление (ПО) [5]:



– автотермический паровой риформинг (АТР) [5]:



При риформинге углеводородного топлива соотношение пар/углерод (S/C – молекула воды на атом углерода) фиксируется на оптимальном уровне, как правило, в избытке. При ПР пар вводится в реактор вместе с топливом, а температура процесса поддерживается сжиганием части топлива в кожухе реактора. Как видно из коэффициентов реакций ПР является более продуктивным по водороду по сравнению с ПО, однако, требует значительных затрат тепловой энергии, обычно вырабатываемых посредством затрат топлива по реакции полного окисления.

ПО – единственный процесс термохимического разложения углеводородов, пригодный для разложения нефтяных фракций тяжелее керосина, надежный и нетребовательный к качеству сырья [6]. Температура полученного газа регулируется соотношением кислород/углерод ( $O_2/C$  – молекула кислорода на атом углерода). Процесс ПО экзотермический и проходит при высоких температурах (850...1600 °С и выше), что обеспечивает высокую степень конверсии сырья, однако при использовании катализатора верхний предел температуры ограничивается на уровне ~1000 °С, так как увеличение температуры может провоцировать спекание катализатора.

АТР позволяет объединить достоинства парциального окисления и парового риформинга. В этом случае вначале инициируется экзотермическая реакция ПО, теплотой которой поддерживается эндотермическая реакция ПР. При АТР водяной пар вводится вместе с топливом и окис-

лителем, участвуя в реакции как реагент для ПР и/или для предотвращения сажеобразования в процессе ПО. Температура выходящего газа также регулируется соотношением кислород/углерод [5].

Для максимального сопряжения основной СЭУ и ЭХЭУ необходимо не только согласование по электрическим параметрам, но и унификация топлива, а также оптимальное использование вторичных энергоресурсов. В данной работе предлагается использовать ЭХГ на основе расплавно-карбонатных (РКТЭ), при использовании в качестве топлива ПГ, или твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), при работе на ДТ, для генерации электрической энергии в портах и зонах жесткого экологического контроля. Достоинствами таких высокотемпературных ТЭ являются: использование недорогих катализаторов, меньшая чувствительность к каталитическим ядам, способность электроокисления СО, высокие плотности тока, толерантность к перегрузкам и недогрузкам. В РКТЭ и ТОТЭ наряду с электроэнергией генерируется высокопотенциальная теплота, которую можно использовать в газовой турбине [7]. В предлагаемой концепции ЭХГ в составе СЭУ обеспечивает замену одного из дизель-генераторов в составе судовой электростанции, используя при этом единую топливную и воздушную системы.

Принципиальная схема ЭХЭУ на основе РКТЭ в составе СЭУ, работающей на ПГ представлена на рис. 1.

ПГ компрессором 1 через фильтр 2 подается в адсорбционный десульфуризатор 3, где газ проходит через сорбционные пластины и подвергается очистке от серосодержащих соединений. Во избежание термического удара в паровом риформере 5, ПГ предварительно нагревается в подогревателе 4. Процесс конверсии происходит с выделением теплоты, т.к. часть топлива сжигается в реакторе для обеспечения рабочих температур на уровне 700...900 °С. В этом элементе формируется основной состав эмиссии ЭХЭУ.

Полученный в результате риформинга синтез-газ подается в ЭХГ 6, высокая рабочая температура которого (650 °С), позволяет выработать водяной пар для процесса парового риформинга с помощью подогревателей 8 и 9. Питательная вода для производства пара подается насосом 12 из цистерны 11 на подогреватель сепаратора газа 10, где из топлива отбирается пар, образовавшийся в результате электрохимической реакции. Конденсат отбирается конденсатоотводчиком 13. Далее топливо через подогреватель 7 поступает в рециркуляционную линию ЭХГ. Пар через подогреватель 15 подается в реактор парового риформинга.

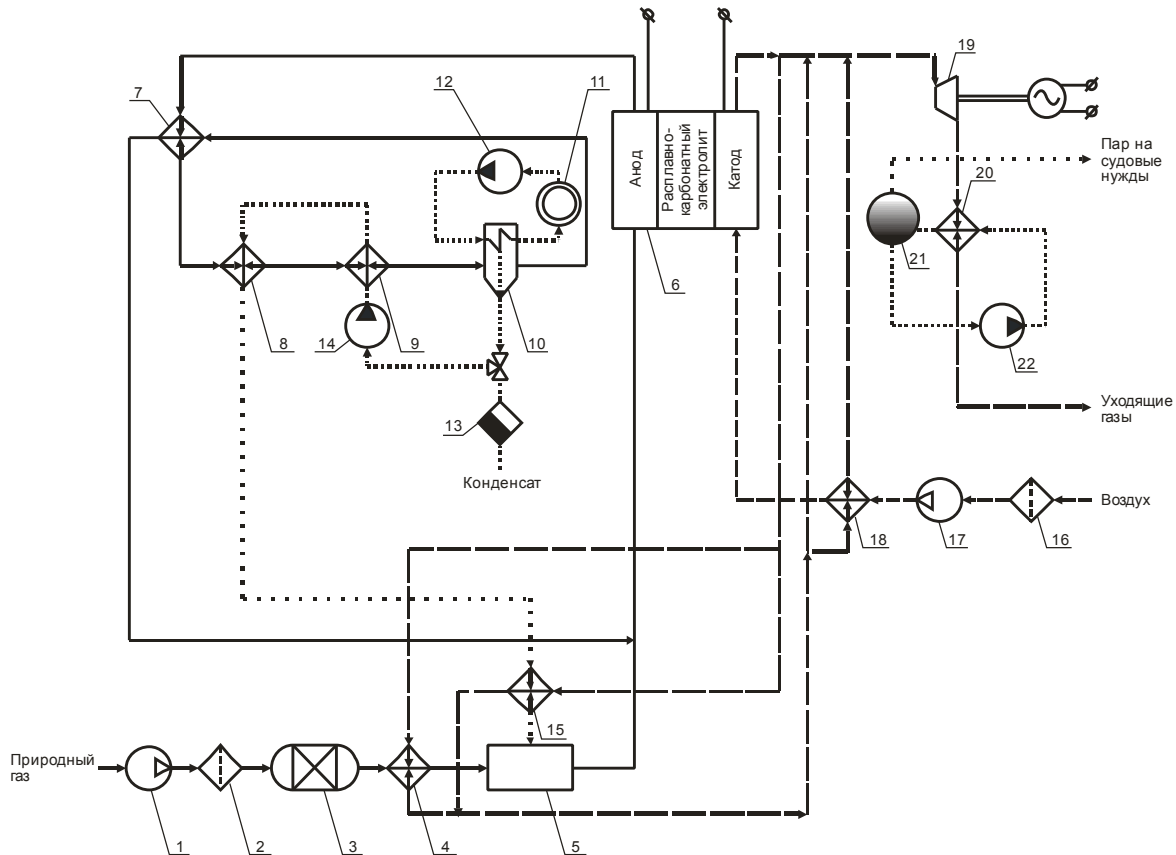


Рис. 1. Концепция СЭУ на ПГ с ЭХГ

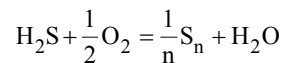
1 – компрессор; 2 – топливный фильтр; 3 – десульфуризатор; 4 – подогреватель топлива; 5 – паровой риформер; 6 – ЭХГ; 7, 8, 9 – подогреватели избыточного топлива; 10 – сепаратор; 11 – цистерны пресной воды; 12, 14 – водяной насос; 13 – конденсатоотводник; 15 – подогреватель пара; 16 – воздушный фильтр; 17 – воздушный компрессор; 18 – подогреватель воздуха; 19 – ГТА; 20 – утилизацонный подогреватель; 21 – конденсатор; 22 – конденсатный насос

Продуктом реакции ЭХГ 6 является газ, на 90% состоящий из водяного пара, который можно использовать как теплоноситель для подогрева: ПГ в подогревателе 4, воздуха в подогревателе 18 и водяного пара в подогревателе 15. Остаточная теплота поступает на ГТА 19 для выработки дополнительной электроэнергии. В подогревателе 20 утилизируется теплота рабочего тела ГТА ( $t = 400...550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), с целью получения насыщенного пара для судовых потребителей. Пресная вода для производства пара подается насосом 22 из цистерны 11 и конденсатора 21.

Принципиальная схема ЭХЭУ на основе ТОТЭ, работающая на ДТ, в составе энергетической установки представлена на рис. 2.

Согласно предложенной концепции ДТ насосом 1 подается через фильтр 2 в десульфуризатор 3, где происходит процесс его очистки от серосодержащих соединений методом селективно-каталитического окисления. В отличие от адсорбционного метода, описанного выше, этот

процесс заключается в преобразовании окислением соединений серы в топливе до элементарной серы, оксидов серы, сульфоксидов, и/или сульфонов, с последующей адсорбцией или сепарацией окисленных соединений серы в условиях окружающей среды.



Очищенное от серы топливо подогревается в подогревателе 4 теплотой продуктов реакции ЭХГ 6 и подается в риформер 5 для дальнейшей конверсии ДТ с целью получения синтез-газа. Конверсию предлагается проводить автотермическим риформингом, при котором реакция протекает при температурах  $700...1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  без выделения или поглощения теплоты, т.к. тепловая энергия экзотермической реакции парциального окисления, протекающая в реакторе 5.1 поглощается эндотермической реакцией в реакторе парового риформинга 5.2.

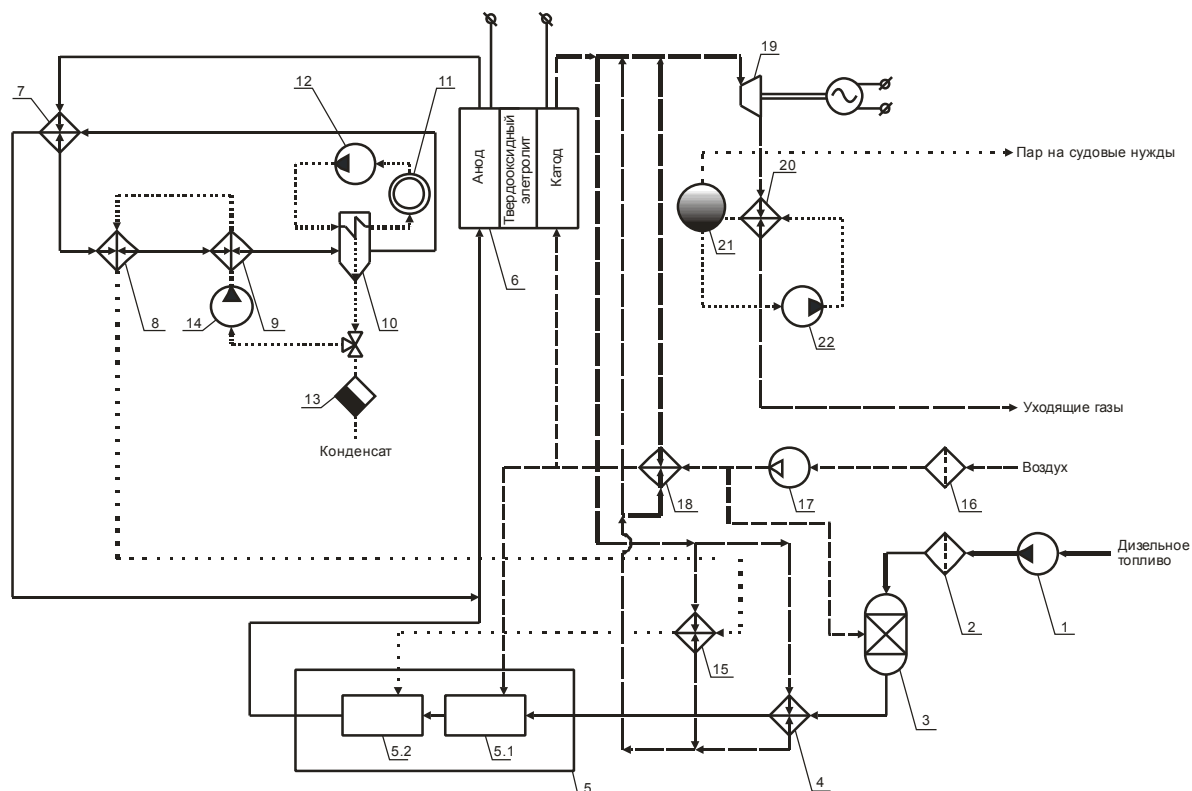


Рис. 2. Концепция СЭУ на ДТ с ЭХГ

1 – топливный насос; 2 – топливный фильтр; 3 – десульфуризатор; 4 – подогреватель топлива; 5 – риформер (5.1 – реактор частичного окисления; 5.2 – реактор парового риформинга); 6 – ЭХГ; 7, 8, 9 – подогреватели избыточного топлива; 10 – сепаратор; 11 – цистерны пресной воды; 12, 14 – водяной насос; 13 – конденсатоотводчик; 15 – подогреватель пара; 16 – воздушный фильтр; 17 – воздушный компрессор; 18 – подогреватель воздуха; 19 – ГТА; 20 – утилизационный подогреватель; 21 – конденсатор; 22 – конденсатный насос

Рабочая температура ЭХГ 6 на основе ТОТЭ (900...1100 °С) позволяет использовать полученную высокопотенциальную тепловую энергию, как на собственные нужды, так и на выработку дополнительной электрической энергии посредством использования газотурбинного агрегата (ГТА). Теплота избыточного (не вступившего в электрохимическую реакцию) топлива утилизируется посредством подогревателей 8, 9 для получения водяного пара, используемого в автотермическом риформере 5, а именно в реакторе парового риформинга 5.2 с предварительным подогревом пара до температуры 450 °С в подогревателе 15. Как и в предложенной концепции ЭХГ с РКТЭ, питательная вода для производства пара подается насосом 12 из цистерны 11 на подогреватель сепаратора газа 10, где из топлива отбирается пар, образовавшийся в результате электрохимической реакции. Конденсат отбирается конденсатоотводчиком 13. Далее подогретое в подогревателе 7 до температуры 750 °С топливо поступает в рециркуляционную линию ЭХГ.

Полученный в ЭХГ 6 газ является теплоносителем для подогрева ДТ в подогревателе 4, воздуха в подогревателе 18 и водяного пара в подогревателе 15. Остаточная теплота поступает

на ГТА 19 для выработки дополнительной электроэнергии. В подогревателе 20 происходит утилизация теплоты рабочего тела, покидающего ГТА ( $t = 600...700$  °С), с целью получения насыщенного пара для судовых потребителей. Пресная вода для производства пара подается насосом 22 из цистерны 11 и конденсатора 21.

## 5. Выводы

Предложены принципиальные схемы судовой ЭХЭУ, работающих на ПГ и ДТ, на основе расплавно-карбонатных и твердоокисных топливных элементов, которые могут служить альтернативой дизель-генераторной установке. Внедрение данной технологии в состав СЭУ позволит повысить эффективность судовых энергоустановок в целом, значительно снизить их воздействие на окружающую среду на режимах стоянки судна в портах или зонах жесткого экологического контроля. Данные схемные решения могут быть использованы на ранних стадиях проектирования СЭУ с ЭХГ.

## Перечень ссылок

1. Суднова енергетика та світовий океан: підручник / В.М. Горбов, І.О. Ратушняк,

- Є.І. Трушляков, О.К. Чередніченко. – Миколаїв: НУК, 2007. – 596 с.
2. Mench M. Fuel Cell Engines : text / M. Mench – New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 515 p.
3. Fuel cell ship in the real world // The Naval Architect. – November 2008. – P. 56-57.
4. Viking Lady tests fuel cell power // Marine Power & Propulsion Supplement. – October 2009. – P. 30.
5. Liu K. Hydrogen and syngas production and purification technologies: text / K. Liu, C. Song, V. Subramani. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. – 546 p.
6. Kolb G. Fuel processing for fuel cells : text / G. Kolb. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008. – 424 p.
7. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки: научное издание / Н.В. Коровин. – М. : МЭИ, 2005. – 208 с.

Поступила в редакцию 01.06.2011

**В.М. Горбов, М.О. Карпов. Концепція суднової енергетичної установки з електрохімічним генератором**

*Запропонована концепція суднової енергетичної установки, яка працює на природньому газі та дизельному паливі, з електрохімічними генераторами на основі розплавно-карбонатних та твердооксидних паливних елементів. Розглянуті основні принципи та методи конверсії вуглеводневого палива. Розроблені методи утилізації вторинних енергетичних ресурсів у суднової електрохімічній установці з метою підвищення її ефективності та приведені схемні рішення. Показані можливості сполучення основної суднової енергетичної установки з електрохімічною енергоустановкою.*

**Ключові слова:** суднова енергетична установка, електрохімічна енергоустановка, електрохімічний генератор, розплавно-карбонатний паливний елемент, твердооксидний паливний елемент, риформер, конверсія.

**V. Gorbov, M. Karpov. The concept of fuel cell ship power plant**

*The concept of the natural gas-fueled molten carbonate fuel cell ship power plants and of the diesel-fueled solid oxide fuel cell ship power plants is proposed. The conversion principles and methods of the hydrocarbon fuels are considered. The methods of the fuel cell ship power plant waste energy utilization are developed towards it efficiency upgrading and the circuit designs are described. The abilities of fuel cell power plant integration to the main ship power plant are demonstrated.*

**Key words:** ship power plant, fuel cell power plant, fuel cell system, molten carbonate fuel cell, solid oxide fuel cell, reformer, conversion.