

## Приборы и оборудование

УДК 629.122:621.352

### Разработка конфигурации судовой электрохимической энергоустановки, работающей на природном газе

**Горбов В.М., Карпов М.А.**

*Национальный университет кораблестроения, Николаев*

Сформирована конфигурация судовой энергетической установки с электрохимическим генератором на основе расплавно-карбонатных топливных элементов, работающей на природном газе. Назначение установки состоит в получении дополнительной электрической энергии для обеспечения судовых нужд. Проведен анализ основных способов конверсии углеводородных топлив. Предложена схема риформинга природного газа для работы электрохимического генератора судовой энергетической установки. Приведено схемное решение утилизации вторичных энергетических ресурсов в судовой электрохимической энергоустановке с целью повышения ее эффективности.

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

Сформовано конфігурацію судової енергетичної установки з електрохімічним генератором на основі розплавно-карбонатних паливних елементів, що працює на природному газі. Призначення установки полягає в отриманні додаткової електричної енергії для забезпечення судових потреб. Проведено аналіз основних способів конверсії вуглеводневих палив. Запропоновано схему риформінгу природного газу для роботи електрохімічного генератора судової енергетичної установки. Наведено схемне рішення утилізації вторинних енергетичних ресурсів у судовій електрохімічній енергоустановці з метою підвищення її ефективності.

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

С вступлением в силу нормативных и законодательных актов, регламентирующих содержание вредных веществ в уходящих газах тепловых двигателей (Конвенция MARPOL 73/78, нормы ИМО — Tier и др.), особую актуальность приобрела необходимость разработки альтернативных схемных решений в судовой энергетической установке (СЭУ) [1]. Одним из способов повышения эффективности СЭУ и сокращения эмиссии является применение электрохимических

генераторов (ЭХГ) на основе топливных элементов (ТЭ) [2]. На стадии предпроектных решений разработка конфигурации СЭУ с ЭХГ и адаптация их к работе на судовом топливе являются важными задачами.

Особенностями и проблемами внедрения ЭХГ на основе ТЭ как составляющей такой СЭУ посвящено множество публикаций и исследований. Больших успехов в развитии данной разработки достигла фирма MTU, которая

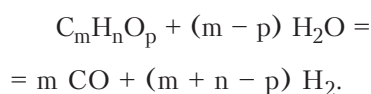
в рамках международного проекта FellowSHIP совместно с судоходной компанией Eidesvik ввела в эксплуатацию судно для обслуживания газодобывающих платформ «Viking Lady» с экспериментальной электрохимической энергоустановкой (ЭХЭУ) на основе расплавно-карбонатных ТЭ (РКТЭ) мощностью 320 кВт. ЭХЭУ этого судна проходит тестовые испытания в качестве вспомогательных источников электрической энергии. Она имеет полную автономность относительно основной СЭУ и проработала более 7000 ч в условиях Северного моря [3, 4].

Разработка конфигурации и схемных решений СЭУ с интегрированной ЭХЭУ представляет собой сложную задачу из-за отсутствия необходимой информации.

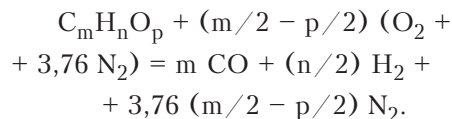
Цель настоящей работы — формирование конфигурации СЭУ с ЭХГ, работающей на природном газе (ПГ) с использованием топливной и воздушной системы основной СЭУ, а также определение способов утилизации вторичной энергии судовыми потребителями и обеспечения тепловой энергией внутрисистемных устройств.

ПГ является одним из перспективных судовых топлив, однако он не может быть использован непосредственно в ТЭ. В качестве топлива для ЭХГ используют водород или синтез-газ, полученный при риформинге ПГ. При многоступенчатой кислородной и (или) паровой конверсии можно получать водородсодержащий газ с объемной долей водорода до 80 %, остальное — преимущественно углекислый газ. Кроме того, во избежание отравления катализаторов риформера на различных этапах конверсии топлива, а также отравления катализаторов на электродах ТЭ, необходимо очищать ПГ от примесей серы до уровня  $10 \text{ млн}^{-1}$  (для расплавно-карбонатных ТЭ). Целью риформинга углеводородного топлива для применения в энергоустановках с ЭХГ является обеспечение максимального выхода водорода из исходного топлива, что требует создания определенных условий процесса.

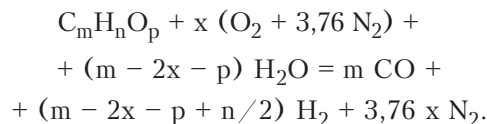
Риформинг топлива может проходить по эндо-, экзо- или автотермическому механизму [5]. Паровой риформинг (ПР) ПГ сопровождается выделением тепловой энергии  $\Delta H = +205,9 \text{ кДж/моль}$ :



Парциальное окисление (ПО) ПГ является эндотермическим процессом и сопровождается поглощением теплоты  $\Delta H = -36 \text{ кДж/моль}$  [5]:



При объединении двух вышеуказанных процессов возможно достижение протекания реакции без выделения или поглощения теплоты — автотермический риформинг (АТР) [5]:



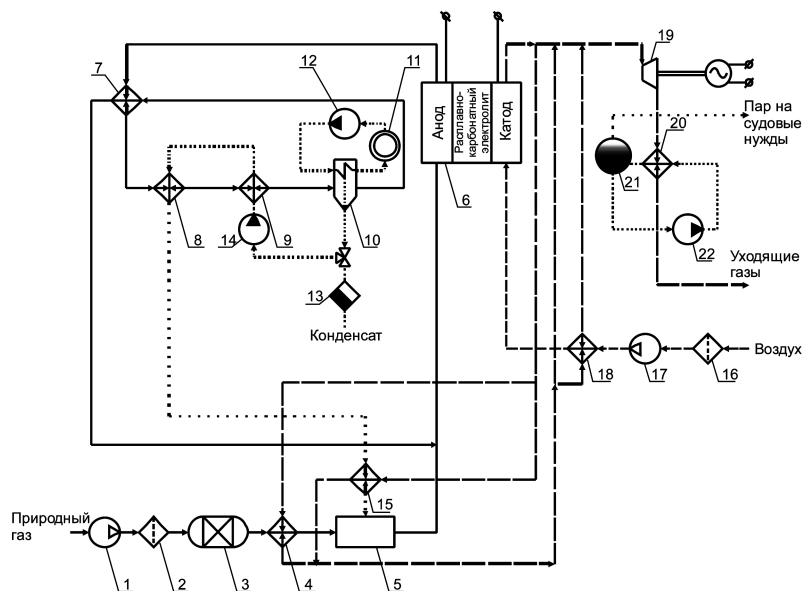
Соотношение пар/углерод (S/C — молекула воды на атом углерода) при преобразовании ПГ фиксируется на оптимальном уровне, как правило, в избытке. При ПР пар вводится в реактор вместе с топливом, а температура процесса поддерживается сжиганием части топлива в кожухе реактора.

Из коэффициентов реакций видно, что ПР является более продуктивным по водороду по сравнению с ПО, но требует значительных затрат тепловой энергии, обычно вырабатываемых посредством затрат топлива для поддержания реакции полного окисления в кожухе реактора. Однако, ПО является единственным процессом термохимического разложения углеводородов, пригодным для разложения нефтяных фракций тяжелее керосина [6].

При ПО температура полученного газа регулируется соотношением  $O_2/C$  (молекула кислорода на атом углерода). Процесс ПО проходит при высоких температурах ( $850-1600 \text{ }^\circ\text{C}$  и выше), что обеспечивает высокую степень конверсии сырья, однако при использовании катализаторов верхний предел температуры ограничивается на уровне около  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , так как увеличение температуры может привести к спеканию катализатора.

Объединения достоинств парциального окисления и парового риформинга можно достичь при АТР. В таком процессе вначале инициируется экзотермическая реакция ПО, теплота которой поддерживает эндотермическую реакцию ПР. При АТР водяной пар вводится вместе с топливом и окислителем, 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 достижения максимального сопряжения основной СЭУ и ЭХЭУ необходимо не только согласование по электрическим параметрам, но и унификация топлива, а также опти-



Концепция СЭУ на ПГ с ЭХГ: 1 – компрессор; 2 – топливный фильтр; 3 – десульфуризатор; 4 – подогреватель топлива; 5 – паровой риформер; 6 – ЭХГ; 7–9 – 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.

мальное использование вторичных энергоресурсов. В данной работе предлагается использовать ЭХГ на основе РКТЭ для производства электрической энергии на судовые нужды в портах и зонах жесткого экологического контроля. К достоинствам такого типа ТЭ можно отнести использование недорогих катализаторов, меньшую чувствительность к каталитическим ядам, способность окисления СО, высокие плотности тока, толерантность к перегрузкам и недогрузкам. В РКТЭ наряду с электроэнергией генерируется высокопотенциальная теплота, которую можно использовать в газовой турбине [7]. В предлагаемой конфигурации ЭХГ в составе СЭУ обеспечивает замену одного из дизель-генераторов в составе судовой электростанции, используя при этом единую топливную и воздушную систему.

Принципиальная схема ЭХЭУ на основе РКТЭ в составе СЭУ, работающей на ПГ, представлена на рисунке. 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, так как часть топлива сжигается в реакторе для обеспечения рабочих температур 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.

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 ( $t = 400\text{--}550\text{ °C}$ ) с целью получения насыщенного пара для судовых потребителей. Пресная вода для производства пара подается насосом 22 из цистерны 11 и конденсатора 21.

### Выводы

Предложена принципиальная схема судовой ЭХЭУ, работающей на ПГ, на основе РКТЭ, которая может быть использована как альтернатива вспомогательной дизель-генераторной установке. Интеграция такой установки в состав СЭУ даст возможность увеличить эффективность судовых энергоустановок в целом, значительно снизить их воздействие на окружающую среду на режимах стоянки судна в портах или зонах жесткого экологического контроля. Приведенная конфигурация может быть использована в качестве схемного решения СЭУ с ЭХГ на ранних стадиях проектирования.

### Список литературы

1. Горбов В.М., Ратушняк И.О., Трушляков С.И., Череди́ченко О.К. Судовая энергетика та світовий

- океан : Підруч. — Миколаїв : Нац. ун-т кораблебудування, 2007. — 596 с.
2. Mench M. Fuel Cell Engines. — New Jersey : John Wiley & Sons, 2008. — 515 p.
  3. Fuel cell ship in the real world // The Naval Architect. — 2008. — Nov. — P. 56–57.
  4. Viking Lady tests fuel cell power // Marine Power & Propulsion Supplement. — 2009. — Oct. — P. 30.
  5. Liu K., Song C., Subramani V. Hydrogen and syngas production and purification technologies. — New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. — 546 p.
  6. Kolb G. Fuel processing for fuel cells. — Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008. — 424 p.
  7. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. — М. : Моск. энергет. ин-т, 2005. — 208 с.

Поступила в редакцию 13.09.11

## The Configuration of Ship Electrochemical Power Plant Operating on Natural Gas Development

*Gorbov V.M., Karpov M.A.*

*National University of Shipbuilding, Nikolaev*

The configuration of ship power plant with electrochemical generator on molten carbonate fuel cells basis operating on natural gas is formulated. The installation function is to obtain of additional electricity for ship needs. The analysis of the main methods of hydrocarbon fuels conversion is executed and natural gas reforming scheme for electrochemical generator of ship power plant operation is proposed. The scheme of secondary power resources utilization in electrochemical power plant towards its efficiency increase is aduced.

**Key words:** ship power plant, electrochemical power plant, electrochemical generator, molten carbonate fuel cell, reformer, conversion.

Received September 13, 2011

УДК 66.011:66.040.2

## Математическое моделирование процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц. 1. Математическое описание процесса

*Хвастухин Ю.И., Колесник В.В., Орлик В.Н., Цюпяшук А.Н.*

*Институт газа НАН Украины, Киев*

Разработано математическое описание процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц для детального его исследования, цель которого проектирование нового эффективного оборудования либо модернизация существующего.

**Ключевые слова:** дегидратация мелкодисперсных частиц, псевдооживленный слой, математическая модель.

Розроблено математичний опис процесу дегідратації дрібнодисперсних частинок у псевдозрідженому шарі інертних частинок для детального його дослідження, мета якого проектування нового ефективного обладнання або модернізація існуючого.

**Ключові слова:** дегідратація дрібнодисперсних частинок, псевдозріджений шар, математична модель.