

УДК 629.12.03

А.К. ЧЕРЕДНИЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА ДЛЯ СУДОВ-ГАЗОВОЗОВ

В данной статье обсуждается эффективность применения термохимической регенерации сбросного тепла в энергетических комплексах современных судов-газовозов. Основной целью исследования является анализ состава и характеристик перспективных энергетических установок газовозов и разработка схемных решений комбинированных дизель-газотурбинных установок с термохимической регенерацией сбросного тепла. Проведен анализ температурных потенциалов сбросного тепла малооборотного, среднеоборотного дизельного двигателя и газотурбинного двигателя. Предложена схема комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов путем конверсии испаряющегося при перевозке груза, приведены основные положения математической модели энергетической установки с термохимической регенерацией. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергетических установок современных судов-газовозов. Установлено, что для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных газотурбинных двигателей соотношение мощностей дизельного и газотурбинного двигателя лежит в пределах 5б.

Ключевые слова: LNG-газовоз, энергетическая установка, конверсия топлива, термохимическая регенерация тепла, двигатель внутреннего сгорания, газотурбинный двигатель, синтез-газ.

Введение

Применение альтернативной энергетики, основанной на использовании возобновляемых источниках энергии, в ближайшие десятилетия компенсирует не более четверти мирового энергопотребления. Основным энергоносителем будет оставаться ископаемое углеводородное топливо, в том числе природный газ. Несмотря на то, что трубопроводы останутся основным методом транспортировки данного сырья, к 2035 году почти половина этого энергоносителя будет транспортироваться в виде сжиженного природного газа (LNG) судами-газовозами LNG [1]. Доля таких судов в мировом флоте растет (рис. 1).

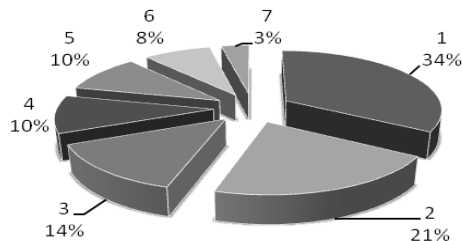


Рис. 1. Состав мирового флота на 01.01.2015:
1 – балкеры; 2 – универсальные сухогрузные суда;
3 – танкеры-продуктовозы; 4 – контейнеровозы;
5 – танкеры-химовозы; 6 – Ро-Ро/пассажирские суда;
7 – газовозы LNG

Таблица 1
Рост показателей индустрии LNG
за 20 лет [2]

Характеристики	1993	2003	2013
Количество заводов по сжижению природного газа	11	15	26
Количество приемных терминалов	31	46	104
Количество газовозов LNG	76	152	393
Количество стран-импортеров	9	13	29
Импорт LNG (млн. т)	61,0	125,2	236,9

Основным компонентом сжиженного природного газа является метан (87...98%), а также этан (1,4...9,5%), пропан (0,4...2,5%), бутан (0,1...0,5%) и азот (0,1...0,5%). Сжиженный природный газ транспортируется при атмосферном давлении и при температурах ниже точки кипения метана ($-161,5$ °C). Это позволяет уменьшить объем перевозимого груза примерно в 600 раз.

Газовозы выполняются по двум конструктивным схемам: с автономными резервуарами, например типа Moss (сферические) и с мембранными резервуарами. Суда второго типа получили в настоящее время наибольшее распространение и составляют 75% мирового флота газовозов LNG [3]. Наиболее крупными судами являются построенные в период 2007–2010 годы 31 судно класса Q-flex и 14 судов

класса Q-max. Для заказов 2014 года средний размер грузоместимости газовоза составил 161 тыс. м³.

В качестве критерия оценки потерь испарившегося в процессе перевозки газа (BOG – Boil-Off Gas) принята величина скорости испарения груза (BOR – Boil Of Rate), которая определяется как процентное отношение потерь за сутки V_{BOG} к общему объему перевозимого груза V_{LNG}

$$BOR = \frac{V_{BOG}}{V_{LNG}}, \quad (1)$$

где BOR – %/сут.

По данным [4] для современных газовозов в грузовом рейсе BOR = 0,1–0,15%, в балластном рейсе 0,06–0,1%, в зависимости от конструктивной схемы и поколения судна.

Важными показателями эффективности любого транспортного судна, в том числе газовоза, являются характеристики пропульсивной и вспомогательной установок, образующих единый энергокомплекс. В последние десятилетия все больше внимания уделяется экологическим аспектам эксплуатации судовых энергетических установок (СЭУ). Существует большое разнообразие вариантов комплектации энергетической установки газовоза LNG, конкурирующих между собой по критериям энергоэффективности и экологичности.

В настоящее время энергетические установки газовозов составляют две основные группы:

- с обработкой испаряющегося груза в установке повторного сжижения;
- с использованием испарившегося груза в качестве топлива в энергетической установке.

С точки зрения определения перспективных путей повышения эффективности энергоиспользования наибольший интерес представляет второй вариант.

При исследовании эффективности СЭУ газовоза целесообразно рассматривать установку как энергокомплекс из трех основных взаимосвязанных компонентов: главных двигателей, электроэнергетического оборудования и системы обработки испаряющегося в процессе транспортировки газа.

Перспективным путем повышения эффективности энергокомплексов является термохимическая конверсия углеводородного топлива за счет вторичных энергоресурсов тепловых двигателей.

2. Постановка задачи

Комплексное решение научно-прикладной проблемы повышения эффективности и экологичности энергетических установок судов газовозов на базе рационального использования естественного выпара груза в энергетической установке, требует анализа существующих схемных решений СЭУ, разработки перспективных схем, а также исследования путем математического и экспериментального моделирования процессов в подсистемах и элементах оборудования.

гичности энергетических установок судов газовозов на базе рационального использования естественного выпара груза в энергетической установке, требует анализа существующих схемных решений СЭУ, разработки перспективных схем, а также исследования путем математического и экспериментального моделирования процессов в подсистемах и элементах оборудования.

3. Результаты исследования

Проведенные ранее исследования выявили, что основными факторами, которые влияют на эффективность энергокомплекса с термохимической регенерацией являются:

- температурный потенциал потоков энергоносителей сбросного тепла главных двигателей и их расходы (рис. 2, 3);

- зависимость прироста теплотворной способности продуктов конверсии от температуры реакции.

Анализ ряда публикаций, посвященных исследованию BOG показывает, что основными компонентами испаряющегося в процессе транспортировки груза являются метан (92...98%) и азот (2...8%) [5, 6]. Азот является балластной составляющей и в процессе конверсии углеводородного топлива не участвует. В связи с этим, была проанализирована зависимость разницы ΔH_U теплотворной способности продуктов конверсии метана H_U^{KM} и метана H_U^M от температуры реакции T . Расчет выполнен с использованием констант равновесия основных реакций при давлении 0,1 МПа с обработкой результатов методом регрессионного анализа для располагаемого диапазона температур. Результаты представлены в виде зависимости $\Delta H_U = f(T)$ и в дальнейшем использовались при математическом моделировании процессов в комбинированной установке с термохимической регенерацией тепла:

$$\begin{aligned} \Delta H_U^M = & -(6,0197345 \cdot 10^{-18}) \cdot T^7 + (2,5780853 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - \\ & -(4,4700353 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 + (4,02533939 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 - \\ & -(2,0191104 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 + 0,0056732 \cdot T^2 - 0,830873 \cdot T + \\ & + 49,1241714 \end{aligned}$$

Анализ состава и характеристик существующих и перспективных энергетических установок газовозов LNG позволил выявить следующие основные типы энергетических комплексов на базе двухтопливных (DF - dual-fuel) малооборотных (МОД) и среднеоборотных (СОД) ДВС, двухтопливных паротурбинных и газотурбинных установок:

- DFDM (low-speed diesel mechanical propulsion) - пропульсивная установка с МОД и прямой передачей мощности на винт;

- DFMSM (steam turbine mechanical propulsion) – паротурбинная пропульсивная установка;
- DFDE (medium-speed diesel electric propulsion) – дизель-электрическая пропульсивная установка;
- DFGE (gas turbine electric propulsion) – газотурбоэлектрическая пропульсивная установка;
- DFCOGES (combined gas and steam turbines electric propulsion) – комбинированная газопаротурбоэлектрическая пропульсивная установка;
- DFCDMDE (combined low-speed diesel mechanical and diesel electric propulsion) – комбинированная пропульсивная установка с МОД и прямой передачей мощности на винт совместно с дизель-электрической пропульсивной установкой;
- DFCDMGE (combined low-speed diesel mechanical and steam turbine electric propulsion) – комбинированная пропульсивная установка с МОД и прямой передачей мощности на винт совместно с газотурбоэлектрической пропульсивной установкой;
- DFCDMSE (combined low-speed diesel mechanical and steam turbine electric propulsion) – комбинированная пропульсивная установка с МОД и прямой передачей мощности на винт совместно с паротурбоэлектрической пропульсивной установкой;
- DFCDMCOGES (combined low-speed diesel mechanical and steam turbine electric propulsion) – комбинированная пропульсивная установка с МОД и прямой передачей мощности на винт совместно с газопаротурбоэлектрической пропульсивной установкой.

Кроме того, перспективными являются и трехтопливные (TF – triple fuel) установки TFDE. В установках такого типа предусматривается использование тяжелого (HFO), легкого (MDO, MGO) и газообразного топлива, что обеспечивает эксплуатационную гибкость с возможностью оптимизации нагрузки энергетической установки на различных скоростях движения судна.

Методами математического моделирования были проанализированы характеристики энергетических установок разного состава для судов-газовозов. При моделировании учитывались энергетические затраты, связанные с компримированием BOG при подаче в двигатель.

Сопоставление тепловых потенциалов сбросного тепла перспективных к применению в составе энергокомплексов современных газовозов малооборотных, среднеоборотных дизельных двигателей и газотурбинных двигателей (ГТД) (рис. 2,3), показало, что температурный потенциал вторичных энергоресурсов ГТД более перспективен, чем у СОД и МОД для термохимической конверсии метана.

В результате анализа характеристик существующих и альтернативных мобильных энергетических установок сформулирована рабочая гипотеза научного исследования, о том, что на судах-газовозах использование газа естественного выпара груза как топлива энергетической установки рационально осуществлять в комбинированной установке с термохимической регенерацией (ТХР) вторичных энергоресурсов СЭУ.

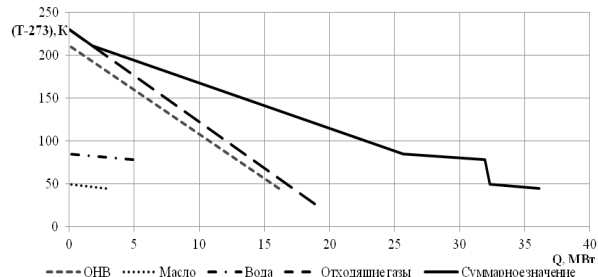


Рис. 2. Потенциал вторичных энергоресурсов судовой МОД мощностью ≈ 42,3 МВт [7]

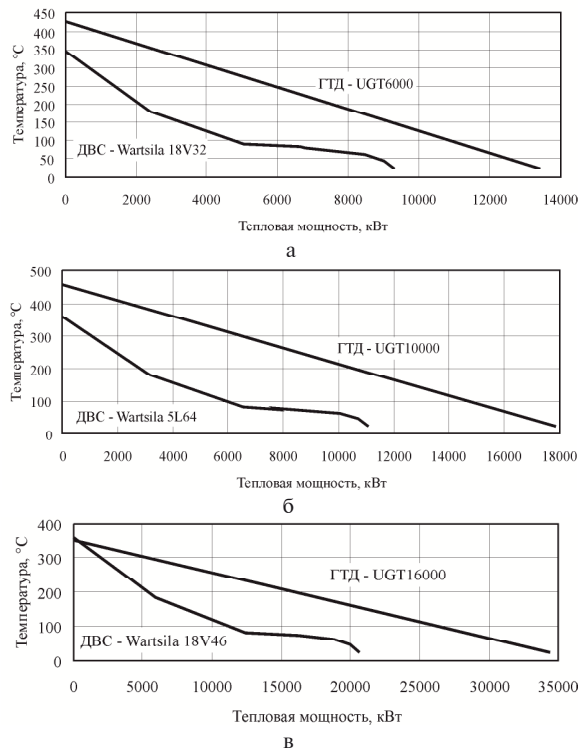


Рис. 3. Зависимость между температурой теплоносителей и тепловой мощностью сбросного тепла для ГТД и СОД: а) мощность ≈ 6,5 МВт; б) ≈ 10,5 МВт; в) ≈ 16 МВт

Применение современных объектно-ориентированных подходов к проектированию сложных технических систем [8, 9] при совмещении принципов стратегии функциональной декомпозиции с инкапсуляцией подсистем, позволило при моделировании представить данную энергетическую установку в виде си-

стемы из трех функционально взаимосвязанных подсистем:

- энергетической подсистемы, в которой химическая энергия топлива преобразуется в механическую, электрическую и тепловую энергию;

- подсистемы утилизации тепла, предназначенной для преобразования сбросной теплоты энергетической подсистемы в механическую, электрическую и тепловую виды энергии;

- технологической подсистемы конверсии топлива.

Связь между элементами подсистем осуществляется потоками энергоносителей (теплоносителей и рабочих тел циклов), посредством которых осуществляются процессы энергетического взаимодействия между подсистемами и в целом, в энергетической установке.

При моделировании процессов испарения перевозимого груза использовались методики и алгоритмы, сформулированные в [6, 10].

Углубленный анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерации теплоты и характеристик ДВС, который работает на продуктах конверсии VOG, базируется на положениях, предложенных автором в работах [11-13].

В качестве критерия эффективности энергокомплекса принят удельный расход топлива C_N , кг/(кВт·час).

Данные подходы позволили реализовать блочную схему для отдельного моделирования процессов в элементах комбинированной энергетической установки как при теоретическом (рис. 4), так и при экспериментальном исследовании (рис. 5).

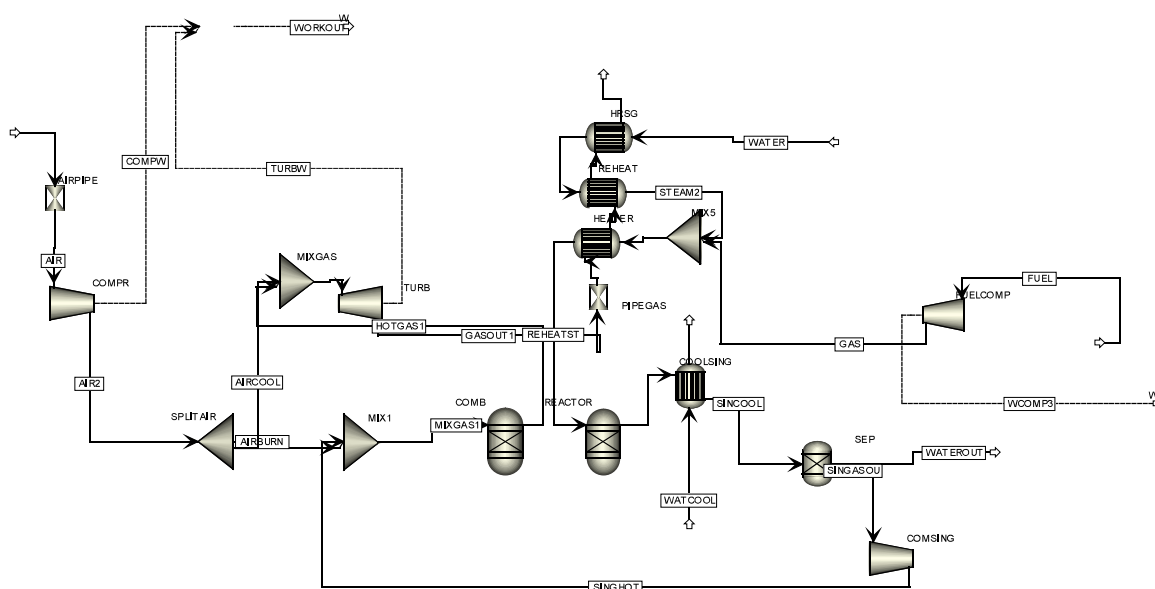


Рис. 4. Фрагмент модели энергокомплекса на базе газотурбинного двигателя с термохимической регенерацией тепла отходящих газов (Aspen Plus)

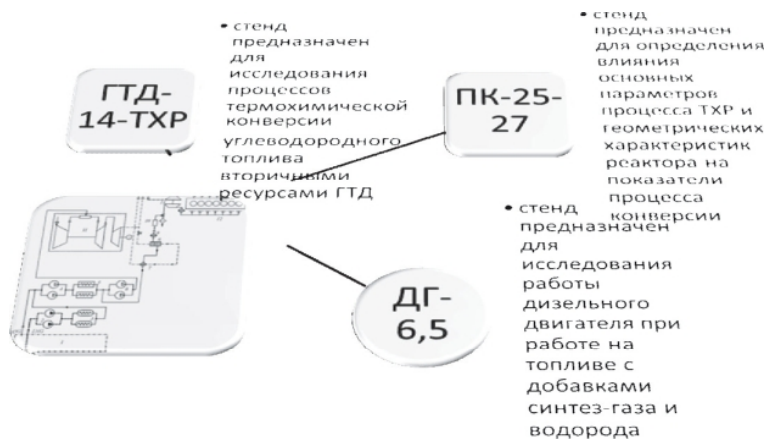


Рис. 5. Пример функциональной декомпозиции экспериментальной установки при исследовании характеристик дизель-газотурбинной установки с ТХР

Расчеты показывают, что теплового потенциала отходящих газов современного ГТД при отношении мощностей дизельного среднеоборотного и газотурбинного двигателя $N_e^{ДВС} / N_e^{ГТД} \approx 56$ достаточно, для получения объема синтез-газа, необходимого для работы ДВС.

Заключение

Проведенные научные исследования позволили сформулировать следующие научные положения:

1. Применение на судах-газовозах термохимической регенерации естественного выпара груза за счет вторичных энергоресурсов в комбинированной энергетической установке повышает эффективность на 4...5% за счет рационального использования температурного потенциала вторичных энергоресурсов.

2. Рациональное соотношение мощности газотурбинной и дизельной части комбинированной энергетической установки с ТХР судна-газовоза составляет 0,2...0,3.

3. Представляет интерес исследование характеристик индекса энергоэффективности судна газовоза при применении термохимической регенерации теплоты вторичных энергоресурсов в комбинированной энергетической установке.

Литература

1. BP Energy Outlook 2035 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2015/bp-energy-outlook-2035-booklet.pdf>.

2. LNG SHIPPING AT 50. A COMMEMORATIVE SIGTTO/GIIGNL PUBLICATION. OCTOBER 2014.

3. IGU World LNG Report – 2016 Edition [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/Publications/lng-shipping-at-50-compressed.pdf.

4. Gomski P. Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers [Text] / P. Gomski, R. Michalski // Journal of Polish Cimas, Energetic aspects. – Gdask. – 2011. – Vol. 6, №. 1. – P. 133–140.

5. Dobrota D. Problem of Boil - off in LNG Supply Chain [Text] / D. Dobrota, B. Lalik,

V. Komar // Transactions on maritime science. – 2013. – Vol. 02. – P. 91-100.

6. A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation [Text] / George G. Dimopoulos, Christos A. Frangopoulos // Int. J. of Thermodynamics. – 2008. – Vol. 11, № 3. – P. 123-131.

7. Утилизация низкопотенциального тепла ДВС 9G80 ME металлгидридной установкой непрерывного действия [Электронный ресурс] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – № 1. – С. 35-41. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/dvs_2014_1_10.

8. Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design [Text] / H. M. Gaspar, A. Ross, D.H. Rhodes, S. Erikstad [at al] // Int'l Maritime Design Conference. – UK. : Glasgow, – 2012. – p. 150-160.

9. Erikstad S.O., A Ship Design and Deployment Model for Non-Transport Vessels [Text] / S.O Erikstad, S. Solem, K. Fagerholt // Ship Technology Research. – 2011. – vol. 58, № 3. – P. 132-141.

10. Dimopoulos G. G. Thermoeconomic Simulation of Marine Energy Systems for a Liquefied Natural Gas Carrier [Text] / George G. Dimopoulos, Christos A. Frangopoulos // Int. J. of Thermodynamics. – 2008. – Vol. 11, №. 4. – P. 195-201.

11. Ткач М. Р. Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов [Текст] / М. Р. Ткач, А. К. Чердниченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 19–22.

12. Чердниченко А. К. Оценка эффективности термохимической регенерации тепла в дизель-газотурбинной энергетической установке [Текст] / А. К. Чердниченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – Херсон, ХДМА. – 2014. – №2(11). – С. 89-96.

13. Чердниченко А. К. Повышение эффективности комбинированной энергетической установки термохимической регенерацией тепла [Текст] / А. К. Чердниченко, М. Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 7(124). – С. 94-99.

Поступила в редакцию 12.07.2016

О.К. Чередниченко. Моделивання енергокомплексу з термохімічною регенерацією тепла для суден-газовозів

У даній статті обговорюється ефективність застосування термохімічної регенерації скидного тепла в енергетичних комплексах сучасних суден-газовозів. Основною метою дослідження є аналіз складу і характеристик перспективних енергетичних установок газозовів і розробка схемних рішень комбінованих дизель-газотурбінних установок з термохімічною регенерацією скидного тепла. Проведено аналіз температурних потенціалів скидного тепла малооборотного, середньооборотного дизельних двигунів і газотурбінного двигуна. Запропоновано схему комбінованої дизель-газотурбінної установки з термохімічною регенерацією тепла відхідних газів шляхом конверсії випаровується при перевезенні вантажу. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні енергетичних установок сучасних суден-газовозів. Встановлено, що для наявного температурного діапазону газів, що відходять сучасних серійних газотурбінних двигунів співвідношення потужностей дизельного і газотурбінного двигуна лежить в межах 5б.

Ключові слова: LNG газозов, енергетична установка, конверсія палива, термохімічна регенерація тепла, двигун внутрішнього згорання, газотурбінний двигун, синтез-газ.

O.K. Cherednichenko. Modeling of efficiency of ship power plants with thermochemical heat recovery for liquefied natural gas carriers

This article discusses efficiency of thermochemical heat recovery of waste heat for liquefied natural gas carriers. Some results of research have been shown. The main aim of the research is the enlarged analysis of characteristic of combined diesel-gas turbine power plant. The power plant consist of gas turbine engine with the thermochemical heat recovery and internal-combustion engine specification which operates on the conversion of fuel. The analysis of the temperature potentials of waste heat of the slow, medium speed diesel engine and gas turbine engine is provided. A scheme of combined diesel-gas turbine power plant with the thermochemical heat recovery of exhaust gases with the conversion of Boil Of Gas is considered. The results of research may be used in the development of ship power plants of liquefied natural gas carriers.

Key words: LNG carrier, power plant, conversion of fuel, thermochemical heat recovery, ethanol, internal combustion engine, gas turbine engine, synthesis gas.