

УДК 621.438

А. К. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, М. Р. ТКАЧ

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Приведены результаты исследования эффективного КПД комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов газотурбинного двигателя путем паровой конверсии углеводородного топлива. Эффективность конверсии оценивалась коэффициентом увеличения теплоты сгорания. Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора. Исследование методами математического моделирования процессов показывает, что при термохимической регенерации паров LNG коэффициент полезного действия установки увеличивается на 4–5 %. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергетических установок стационарных и мобильных объектов.

Ключевые слова: конверсия топлива, комбинированная установка, термохимическая регенерация тепла, теплота сгорания топлива, математическое моделирование процессов.

Постановка проблемы

Прогнозы экспертов энергорынка [1] показывают увеличение мирового потребления энергии более чем на 50 % в ближайшие 30 лет. Повышение эффективности процессов преобразования энергии топлива в энергетических комплексах на базе тепловых двигателей является важной и актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений, которое позволяет улучшить не только показатели энергоэффективности, но и экологические характеристики энергоустановок на базе тепловых двигателей, является термохимическая регенерация тепла (ТХР). За счет сбросного тепла теплового двигателя происходит конверсия базового углеводородного топлива с теплотворной способностью H_U^B в синтез-газ, смесь монооксида углерода и водорода, имеющий более высокую теплотворную способность H_U^K . Результаты исследования процессов термохимической конверсии углеводородных топлив и характеристик тепловых двигателей с термохимической регенерацией сбросного тепла приведены в ряде работ [2–5].

Эффективность термохимической конверсии зависит от возможности топлива при заданном температурном диапазоне разлагаться на газообразные продукты. В свою очередь, эффективность термохимической регенерации определяется потенциалом тепла отходящих газов теплового двигателя.

Проведенное ранее авторами исследование [6] позволило сопоставить тепловые потенциалы

сбросного тепла таких основных тепловых двигателей энергокомплексов, как среднеоборотный дизельный двигатель и газотурбинный двигатель. Был сделан вывод, что температурный потенциал вторичных энергоресурсов ГТД более перспективен, чем у ДВС при термохимической конверсии.

Перспективным вариантом может быть комбинированная дизель-газотурбинная установка (ДГТУ) с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД путем конверсии углеводородного топлива.

Цель работы

Целью данного исследования является оценка эффективности комбинированной дизель-газотурбинной энергетической установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов газотурбинного двигателя.

Изложение основного материала

Эффективность такой установки может быть исследована методами математического моделирования, при этом многовариантность схемных решений требует выявления взаимосвязей ее элементов методами системного анализа. Предлагаемый в данной работе подход, предполагает упрощенную модель, в которой энергетическая установка рассматривается обособленно от комплекса более крупных систем (энергоустановка как техническая категория, энергоустановка как экономическая категория, энергетика как отрасль экономики и так далее), элементом

которого она является.

Технологические, технико-экономические, организационные связи этих систем могут быть заменены соответствующими количественными характеристиками или обобщенным описанием [7].

С точки зрения физико-химических процессов такая энергетическая установка представляет собой энерготехнологический комплекс. Согласно подходу, сформированному в работе [8], целесообразно рассмотреть четыре иерархических уровня: комплекс в целом, подсистем комплекса, группа оборудования подсистем, оборудование, входящее в группы.

Энерготехнологический комплекс может быть представлен в виде совокупности 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 взаимодейст-

вия между подсистемами и в целом, в энерготехнологическом комплексе. В работе [6] показана модель энерготехнологического комплекса на базе газотурбинного двигателя с регенерацией тепла отходящих газов паровой конверсией этанола.

В данной модели характеристики теплоносителей определяются термодинамическими параметрами и расходом. Принято допущение о стационарном характере процессов в элементах энергетической установки, взаимосвязи между элементами представлены в формализованном виде.

Такой подход позволяет реализовать блочную схему для отдельного моделирования элементов энерготехнологического комплекса. При создании моделей элементов энерготехнологического комплекса использовалась компьютерная система моделирования химико-технологических процессов (рис. 1, 2). В основу модели ГТД положен укрупненный расчет с учетом потерь полного давления и отборов воздуха на охлаждение.

Основными факторами, которые влияют на эффективность энергетической установки с ТХР, являются:

- температурный потенциал потоков энергоносителей сбросного тепла двигателей;
- зависимость изменения коэффициента увели-

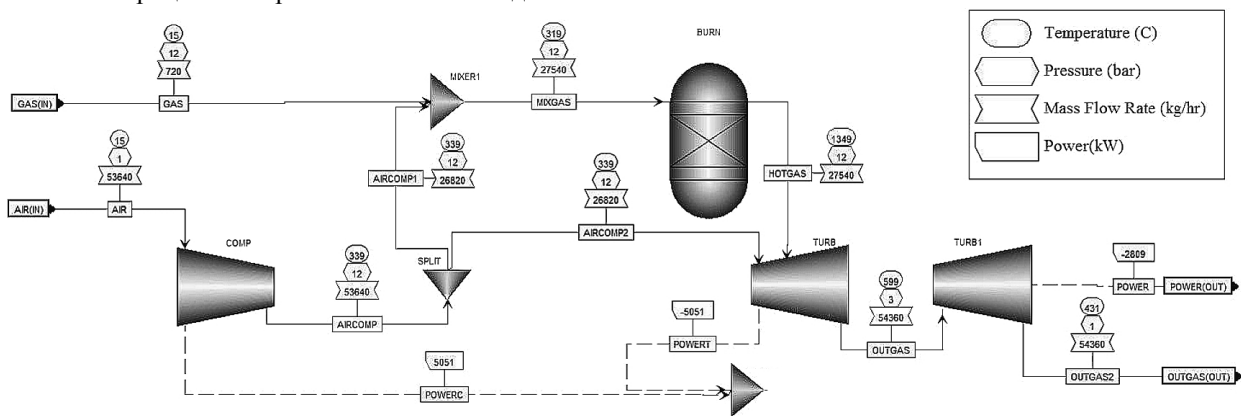


Рис. 1. Модель газотурбинного двигателя

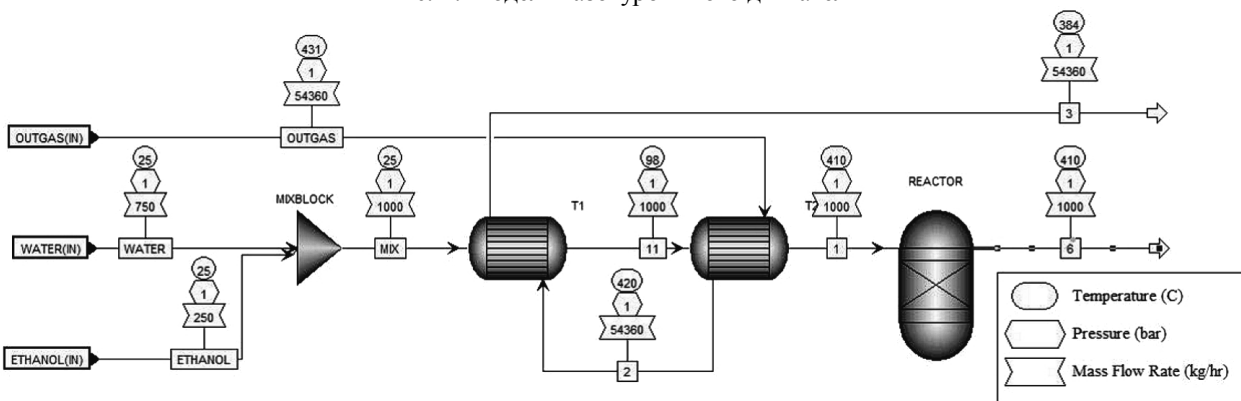


Рис. 2. Модель термохимического реактора

чения теплоты сгорания базового топлива \bar{H}_U от температуры реакции;

– затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива.

Коэффициент увеличения теплоты сгорания базового топлива определяется как

$$\bar{H}_U = \frac{\Delta H_U}{H_U^B},$$

где $\Delta H_U = H_U^K - H_U^B$ – прирост теплотворной способности продуктов конверсии по отношению к характеристикам базового топлива.

Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора [9]

$$\frac{\bar{H}_U \cdot H_U^B \cdot C_N \cdot Ne}{3600} = \Delta T \cdot G_G \cdot c_p,$$

где G_G – расход отходящих газов ГТД; c_p – средняя массовая изобарная теплоемкость отходящих газов в соответствующем температурном диапазоне; $\Delta T = f(G_G, c_p, \bar{H}_U)$ – снижение температуры отходящих газов, необходимое для осуществления конверсии топлива.

Максимальная допустимая температура эндотермической реакции конверсии топлива T_p определена соответственно как

$$T_p = T_4 - \Delta T,$$

где T_4 – температура газа за ГТД.

Результаты определения прироста теплотворной способности продуктов конверсии по отношению к характеристикам базового топлива представ-

лены на рис. 3. Расчет выполнен с использованием констант равновесия основных реакций при давлении 0,1 МПа.

Оценка эффективности комбинированной дизель-газотурбинной энергетической установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов газотурбинного двигателя продемонстрирована на примере энергетической установки газозова для перевозки сжиженного природного газа (LNG - Liquefied Natural Gas).

Состав LNG варьируется в довольно широких пределах, что оказывает влияние на эффективность конверсии. В работах [10, 11] предлагается использовать классификацию LNG по плотности (табл. 1).

Прирост теплотворной способности продуктов конверсии LNG от температуры реакции $\Delta H_U = f(T)$ может быть представлен в виде

$$\begin{aligned} \sum \Delta H_U = & P_M \cdot [a_M \cdot T^7 + b_M \cdot T^6 + c_M \cdot T^5 + \\ & + d_M \cdot T^4 + e_M \cdot T^3 + f_M \cdot T^2 + g_M \cdot T + h_M] + \\ & + P_E \cdot [a_E \cdot T^6 + b_E \cdot T^5 + c_E \cdot T^4 + d_E \cdot T^3 + \\ & + e_E \cdot T^2 + f_E \cdot T + g_E] + P_P \cdot [a_P \cdot T^6 + \\ & + b_P \cdot T^5 + c_P \cdot T^4 + d_P \cdot T^3 + e_P \cdot T^2 + f_P \cdot T + g_P] + \\ & + P_B \cdot [a_B \cdot T^5 + b_B \cdot T^4 + c_B \cdot T^3 + d_B \cdot T^2 + e_B \cdot T + f_B], \end{aligned}$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – коэффициенты, полученные путем обработки результатов расчетов методами регрессионного анализа. По данным [12] в сутки испаряется около 0,1–0,2 % объема перевозимого груза. Испарившийся газ (BOG - Boil-Off Gas) может использоваться в качестве топлива в энергетической установке судна. В работе [13] рассмотрены энергетические уста-

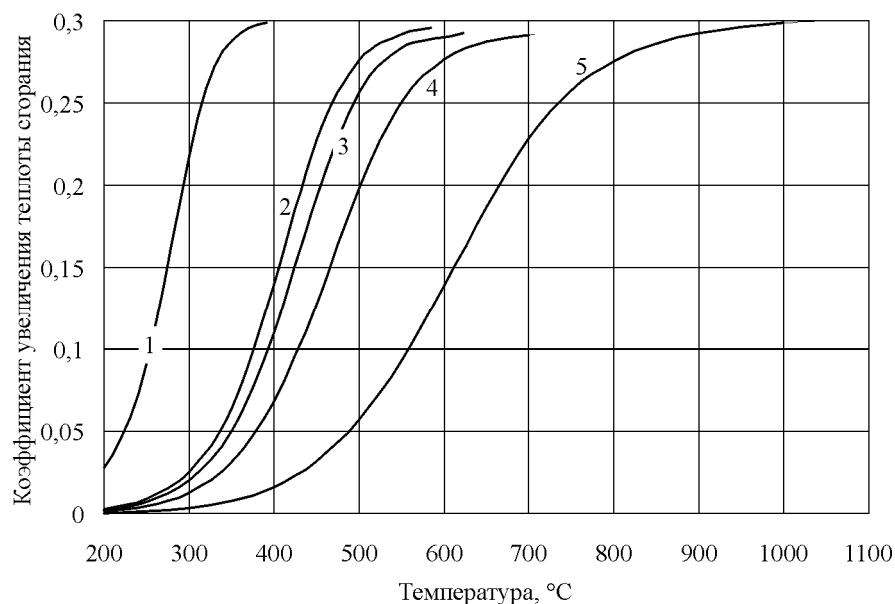


Рис. 3. Зависимость коэффициента увеличения теплоты сгорания от температуры реакции паровой конверсии углеводородных топлив: 1 - этанол, 2 - бутан, 3 - пропан, 4- этан, 5- метан

Таблица 1

Классификация LNG и его характеристики

Характеристики	Обозначение	Размерность	Тип LNG		
			Light	Medium	Heavy
Плотность	ρ	кг/м ³	427,7	445,7	464,8
Компоненты:		%			
метан	P_M		98,0	92,0	87,0
этан	P_E		1,4	6,0	9,5
пропан	P_P		0,4	1,0	2,5
бутан	P_B		0,1	0,0	0,5
азот	P_N	0,1	1,0	0,5	

новки GOGES (комбинированные газопаротурбинные установки с электродвижением) мощностью 40–50 МВт для газовоза LNG грузоместимостью 266 тыс. м³. Согласно представленным в работе исследованиям, установка GOGES на базе 4 ГТД Cyclone SGT 400 (Siemens) и утилизационного паротурбинного контура с котлами двух давлений имеет КПД 50,7 %. Заявленная мощность утилизационного паротурбинного контура составляет 49 % от суммарной мощности установки, что вызывает некоторые сомнения в возможности реализации такой схемы в условиях судна.

В качестве альтернативы может быть предложена дизель-газотурбинная установка с ТХР (рис. 4) суммарной мощностью 45 МВт, в составе газотурбинного двигателя Siemens Cyclone SGT 400 (мощность $N_e^{ГТД} = 12,9$ МВт, температура отходящих газов 555°С) и трех среднеоборотных двигателей Wärtsilä 5L64 мощностью $\sum N_e^{ДВС} = 3 \times 10,7$ МВт.

Методами математического моделирования было проанализировано изменение удельного расхода LNG в ДГТУ с ТХР при ее работе на конвертируемом синтез-газе разного состава (табл. 2). Проанализировано два варианта:

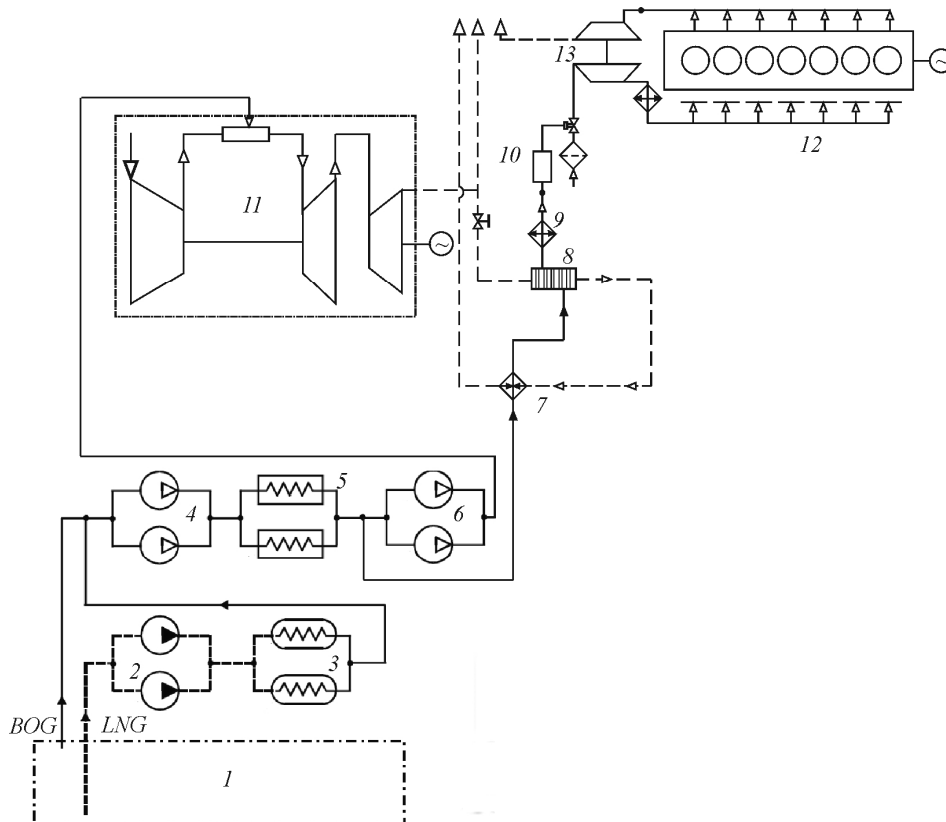


Рис. 4. Схема ДГТУ с ТХР газовоза LNG:

- 1 – танк LNG; 2 – насосы LNG; компрессор ТНА; 3 – испарители LNG; турбина ТНА; 4 – компрессоры низкого давления; ДВС; 5 – подогреватели; охладитель наддувочного воздуха; 6 – компрессоры высокого давления; 7 – утилизационный подогреватель; 8 – термохимический реактор; 9 – охладитель синтез газа; 10 – нейтрализатор; 11 – ГТД; 12 – ДВС; 13, турбонаддувочный агрегат ДВС

Анализ эффективности работы ДГТУ с ТХР

Тип установки	Тип LNG		
	Light	Medium	Heavy
ДГТУ без ТХР	КПД, %		
вариант 1	46,5	46,7	46,7
вариант 2	48,2	48,5	48,9

1. ГТД работает на природном газе, ДВС на конвертируемом синтез-газе;

2. совместная работа ГТД и ДВС на конвертируемом синтез-газе.

Более эффективная работа установки на LNG типа Heavy объясняется высоким содержанием этана в газе такого типа. В данном диапазоне температур конверсии (500–550 °С) прирост теплотворной способности продуктов конверсии этана в три раза превышает этот показатель для метана (рис. 3). В связи с вышеизложенным, представляет интерес в дальнейших исследованиях оценить эффективность предлагаемой схемы энергетической установки применительно к газозовам, специализирующихся на перевозке сжиженного этана.

Согласно приведенным в [14] данным для вышеуказанного газозова LNG типа Q-max в грузовом переходе с полной загрузкой в сутки испаряется до 180 т груза. Проведенные расчеты показывают, что этого достаточно, для обеспечения работы комбинированной дизель-газотурбинной установки с ТХР суммарной мощностью 45 МВт.

Выводы

1. Методами математического моделирования проанализировано влияние температурного потенциала и затрат тепла отходящих газов газотурбинного двигателя на эффективность комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла.

2. Исследование методами математического моделирования процессов в комбинированной дизель-газотурбинной установке с ТХР показывает, что при совместной работе дизельного и газотурбинного двигателей на продуктах конверсии паров LNG коэффициент полезного действия установки увеличивается на 4–5 % и составляет 48–49 %.

3. Дальнейшие исследования комбинированных установок с термохимической регенерацией тепла могут быть направлены на определение эффективности утилизации и регенерации сбросного тепла при конверсии альтернативных топлив.

Литература

1. *The Annual Energy Outlook 2015 [Electronic resources] – Access: [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2015\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2015).pdf) – 2.04.2015.*

2. Cherednichenko, O. *Indicators of the gas turbine unit with the thermo-chemical heat regeneration [Text] / O. Cherednichenko, O. Oschip // MOTROL – Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin, 2013. – Vol. 15, № 2. – P. 165–170.*

3. Kesser, K. F. *Analysis of a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine Power Plant [Text] / K. F. Kesser, M. A. Hoffman, J. W. Baughn // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1994. – Vol. 116. – P. 277–284.*

4. Carcasci, C. *Design issues and performance of a chemically recuperated aeroderivative gas turbine [Text] / C. Carcasci, B. Facchini, S. Harvey // Proc Instn Mech Eng. – 1998. – Vol. 212, Part A. – P. 314–329.*

5. *Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива [Текст] / Н. А. Хрипач, В. Ф. Каменев, В. М. Фомин, С. В. Алешин // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE). – 2006. – №4. – P. 45–50.*

6. Cherednichenko, A. K. *Оценка эффективности термохимической регенерации тепла в дизель-газотурбинной энергетической установке [Текст] / А. К. Череди́ченко // Научный вестник ХДМА. – Херсон : ХДМА, 2014. – № 2 (11). – С. 89–96.*

7. Попырин, Л. С. *Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Л. С. Попырин. – М. : Энергия, 1978. – 415 с.*

8. Ткач, М. Р. *Моделирование эффективности газотурбинных энергетических установок с дополнительной камерой сгорания на базе альтернативных топлив для специализированных судов [Текст] / М. Р. Ткач // УГМТУ : сб. науч. тр. – Николаев : УГМТУ, 2005. – № 2 (401). – С. 62–70.*

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

10. Benito, A. *Accurate determination of LNG quality unloaded in Receiving Terminals [Text] /*

A. Benito // *An Innovative Approach, IGU. – Buenos Aires, 2009. – P. 1–23.*

11. Dobrota, D. *Problem of Boil - off in LNG Supply Chain [Text] / D. Dobrota, B. Lalik, V. Komar // TRANSACTIONS ON MARITIME SCIENCE. – 2013. – № 2. – P. 91–100.*

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

13. Dzida, M. *Comparing combined gas turbine/steam turbine and marine low speed piston engine/steam turbine systems in naval applications [Text] / M. Dzida, W. Olszewski // POLISH MARITIME RESEARCH. – 2011. – Vol 18, № 4(71). – P. 43–48.*

14. Cwilewicz, R. *Proposal of ecological propulsion plant for LNG carriers supplying liquefied natural gas to Świnoujście terminal [Text] / R. Cwilewicz, Z. Górski // Journal of Polish Cimac, Energetic aspects. – Gdańsk, 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 25–31.*

Поступила в редакцию 20.05.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТЕРМОХІМІЧНОЮ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕПЛА

О. К. Чердніченко, М. Р. Ткач

Наведено результати дослідження ефективного ККД комбінованої дизель-газотурбінної установки з термохімічною регенерацією тепла відхідних газів шляхом парової конверсії вуглеводневого палива. Ефективність конверсії оцінювалася коефіцієнтом збільшення теплоти згоряння. Витрати тепла відхідних газів, необхідні для здійснення конверсії палива визначено тепловим балансом термохімічного реактора. Дослідження методами математичного моделювання процесів показує, що при термохімічній регенерації парів LNG коефіцієнт корисної дії установки збільшується на 4-5%. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні енергетичних установок стаціонарних та мобільних об'єктів.

Ключові слова: конверсія палива, комбінована установка, термохімічна регенерація тепла, теплота згоряння палива, математичне моделювання процесів.

RAISING OF EFFICIENCY OF THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY IN COMBINED POWER PLANT

О. К. Cherednichenko, M. R. Tkach

This article discusses efficiency of thermochemical heat recovery of waste heat in power plants. A scheme of combined diesel-gas turbine power plant with the thermochemical heat recovery of exhaust gases with the steam conversion of hydrocarbon fuel is considered. At the mathematic simulation the efficiency of conversion was estimated with the magnification factor of the calorific value. The heat balance of the thermochemical reactor determined the heat input of exhaust gases. The efficiency factor was resolved as the efficiency criterion of the unit. Research shows that for the thermochemical LNG vapor recovery efficiency of the plant is increased by 4-5%. The results of research may be used in the development of power plants of mobile and stationary facilities.

Key words: conversion of fuel, combined power plant, thermochemical regeneration, fuel calorific value, simulation analysis.

Чердніченко Александр Константинович – канд. техн. наук, доц. каф. судовых и стационарных энергетических установок, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: oleksandr.cherednichenko@nuos.edu.ua.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua.