

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Александр Чередниченко

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Пр. Героев Сталинграда, 9, Николаев, Украина.

E-mail: cherednichenko.aleksandr65@gmail.com

Oleksandr Cherednichenko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Heroiv Stalingrada Ave., 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: cherednichenko.aleksandr65@gmail.com

Аннотация. Основной целью исследования является математический анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерации теплоты и характеристик двигателя внутреннего сгорания, который работает на продуктах конверсии. При математическом моделировании процессов эффективность конверсии оценивалась увеличением теплоты сгорания. Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора. В качестве критерия эффективности установки принят удельный расход топлива. Проведен анализ температурных потенциалов сбросного тепла разных тепловых двигателей. Проанализирована схема комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов путем паровой конверсии этанола и определена ее эффективность. Приведены результаты исследования методами математического моделирования показателей энергоэффективности установки. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергетических установок стационарных и мобильных объектов. Установлено, что для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных газотурбинных двигателей схема установки наиболее эффективна для этанола.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, термохимическая регенерация, конверсия топлива, альтернативные топлива, показатели эффективности.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

За последующие 30 лет (2010–2040 годы) потребности человечества в энергии по прогнозам специалистов увеличатся более чем в полтора раза [1]. Основной источник энергии – углеводородное органическое топливо, добыча которого все усложняется при всевозрастающих энергозатратах [2].

Согласно закону Эйнштейна полная энергия тела (энергия покоя) для любого энергоносителя составляет $9 \cdot 10^{10}$ МДж/кг. Так как энергия в топливе содержится в виде, непригодном для ее непосредственного использования, то при существующем уровне техники и технологий возможно весьма незначительное использование полной энергии. Например, при сжигании в качестве топлива метана с удельной низшей

располагаемой теплотой сгорания 50 МДж/кг удается извлечь не более $9 \cdot 10^{-6}$ % полной энергии.

Одним из перспективных направлений, позволяющим улучшить не только показатели энергоэффективности, но и экологические характеристики энергоустановок на базе тепловых двигателей является термохимическая регенерация тепла (ТХР) [3–6]. При этом за счет сбросного тепла теплового двигателя происходит конверсия базового углеводородного топлива с теплотворной способностью H_U^B в синтез-газ, имеющий более высокую теплотворную способность H_U^K .

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Развернутый анализ публикаций, посвященных исследованиям процессов термохимической конверсии углеводородных топлив выполнен в работе [7]. Большое количество публикаций посвящено исследованию характеристик тепловых двигателей с термохимической регенерацией сбросного тепла [8–10].

Современные подходы к проектированию энергетического оборудования предусматривают повышения эффективности путем применения комбинированных установок [11, 12].

В связи с этим представляет интерес создание математической модели взаимосвязи термодинамических параметров тепловых двигателей комбинированной установки и теххимических показателей углеводородного топлива при его термохимической конверсии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данной работы – исследование методами математического моделирования показателей эффективности комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Эффективность установки с термохимической регенерацией тепла может быть исследована методами математического моделирования, при этом многовариантность схемных решений требует выявления взаимосвязей ее элементов методами системного анализа. Предлагаемый в данной работе подход, предпола-

гает упрощенную модель энергетической установки, в которой энергомодуль рассматривается обособленно от комплекса более крупных систем, элементом которых он является.

Технологические, технико-экономические, организационные связи этих систем могут быть заменены соответствующими количественными характеристиками или обобщенным описанием [13].

С точки зрения физико-химических процессов такая энергетическая установка представляет собой энерготехнологический комплекс. Согласно подходу, сформированному в работе [14], целесообразно рассмотреть четыре иерархических уровня: комплекс в целом, подсистем комплекса, группа оборудования подсистем, оборудование входящие 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, предназначенная для преобразования сбросной теплоты энергетической подсистемы в механическую, электрическую и тепловую виды энергии;

- технологической подсистемы конверсии базового углеводородного топлива.

Таким образом, основными факторами, которые влияют на эффективность энергетической установке с термохимической регенерацией являются:

- температурный потенциал потоков энергоносителей сбросного тепла главных двигателей и их расходы;

- зависимость прироста теплотворной способности продуктов конверсии от температуры реакции

$$\Delta H_U = H_U^K - H_U^B$$

Проведенное ранее автором исследование [15] позволило сопоставить тепловые потенциалы сбросного тепла таких перспективных к применению в энергокомплексах энергетических машин как среднеоборотный дизельный двигатель и газотурбинный двигатель (рис. 1).

Перспективность использования того или иного типа углеводородного топлива при термохимической регенерации может быть проанализирована по зависимости разницы теплотворной способности продуктов конверсии и исходного топлива от температуры реакции (рис. 2). Расчет выполнен с использованием констант равновесия основных реакций при давлении 0,1 МПа.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о достаточно высокой эффективности конверсия этанола, для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных ГТД (до 450 °С) [16, 17].

Биоэтанол, достаточно широко используемый в мире как добавка к автобензинам является возобновляемым ресурсом, поэтому паровой риформинг этанола является перспективным выбором базового сырья [18–20].

Методами математического моделирования исследована схема энергокомплекса на базе газотурбинного двигателя UGT2500 (Украина) мощностью

2,8 МВт, отходящие газы которого поступали в термохимический реактор, где отдавали свое тепло для преобразования биотоплива в синтез газ. Была выбрана блочная схема, для отдельного моделирования газотурбинного двигателя и термохимического реактора (рис. 3, 4).

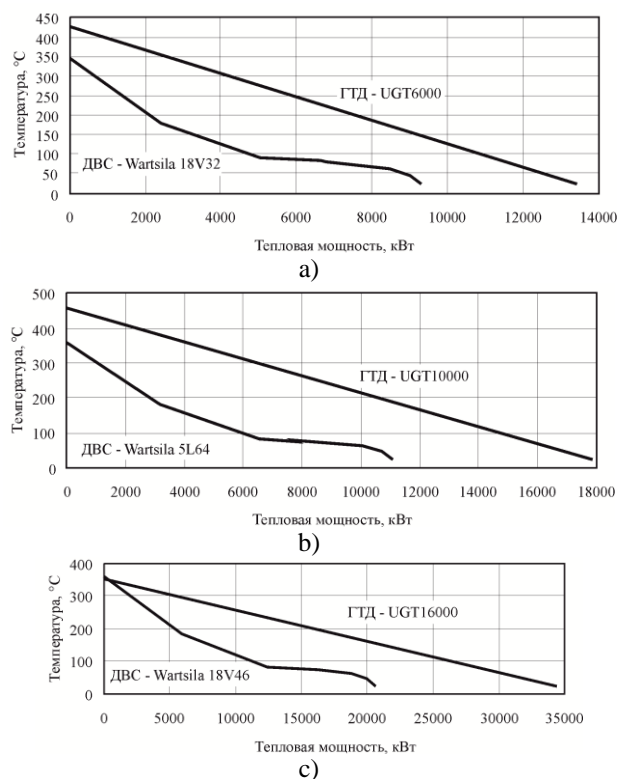


Рис. 1. Зависимость между температурой теплоносителей и тепловой мощностью сбросного тепла для ГТД и СОД:

a) мощность $\approx 6,5$ МВт; b) $\approx 10,5$ МВт; c) ≈ 16 МВт

Fig. 1. Parameters of temperature as a function of heat power of rejected heat from gas turbine engine and diesel engine:

a) power $\approx 6,5$ MW; b) $\approx 10,5$ MW; c) ≈ 16 MW

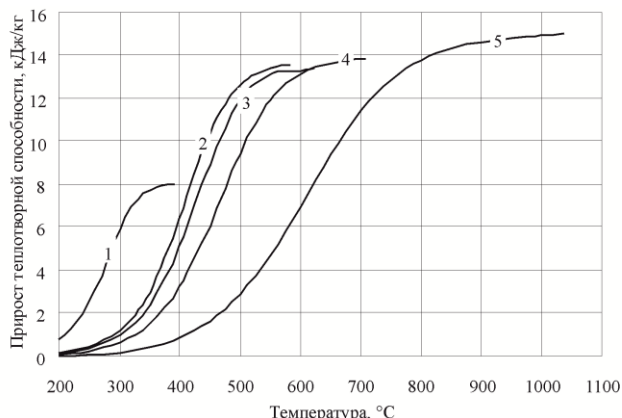


Рис. 2. Зависимость прироста теплотворной способности от температуры реакции паровой конверсии углеводородных топлив:

1 – этанол; 2 – бутан; 3 – пропан; 4- этан; 5- метан

Fig. 2. Parameters of excess fuel calorific value as a function of temperature reaction of steam reforming:

1 – ethanol; 2 – butane; 3 – propane; 4 – ethane;

5 - methane

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

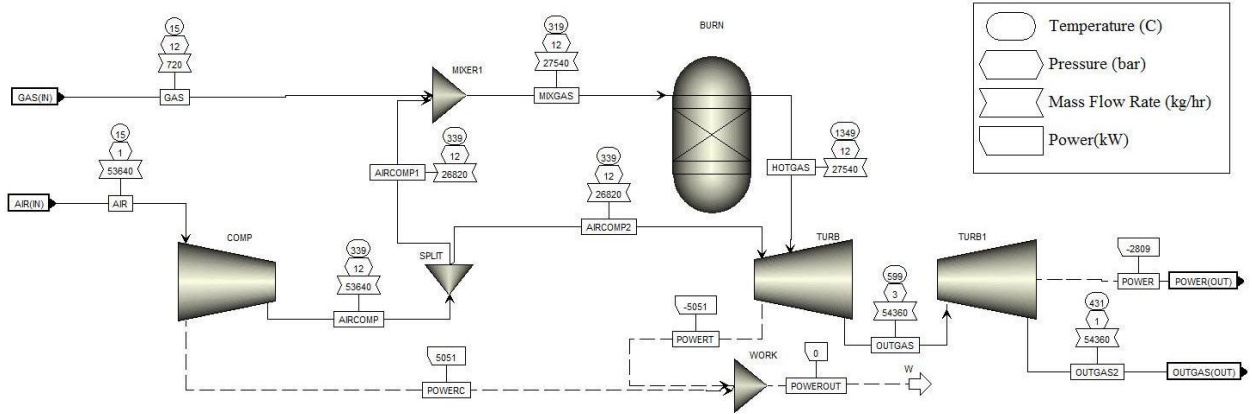


Рис. 3. Схема ГТД
Fig. 3. Scheme of the gas turbine engine

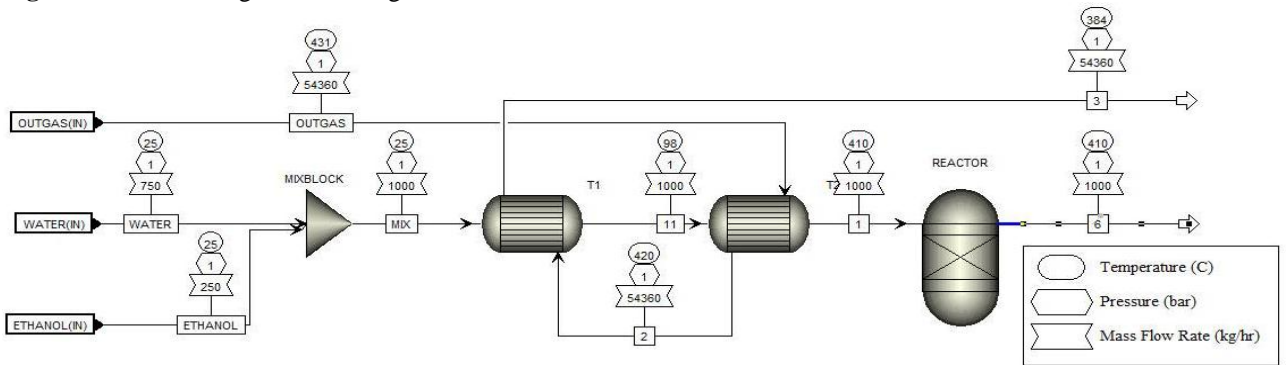


Рис. 4. Схема термохимического реактора
Fig. 4. Scheme of the thermochemical reactor

Подвод тепла к биоэтанолю осуществлялся в две стадии через два теплообменных аппарата. В первом (ТА1) совершалось преобразование жидкой фазы в газообразную, а во втором шел подогрев паровой смеси (ТА2). Исследовано две схемы подключения теплообменников подвода тепла к биоэтанолю (рис. 5).

В результате моделирования было определено, что для первой схемы (ТА1-ТА2) температура конверсии ограничена 365 °С, а для второй схемы (ТА2 – ТА1) температура в реакторе достигает 410°С.

Полученные результаты были использованы при анализе схемы комбинированной дизель-

газотурбинной установки (ДГТУ) с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД путем паровой конверсии биоэтанола.

Расчеты показывают, что теплового потенциала отходящих газов газотурбинного двигателя UGT 2500 достаточно, для получения объема синтез-газа необходимого для работы ДВС Wärtsilä 18V46. Отношение мощностей дизельного и газотурбинного двигателя $N_e^{ДВС} / N_e^{ГТД}$ при этом составляет ≈ 6 . Уменьшение удельного расхода топлива для ДВС Wärtsilä 18V46 составляет для биоэтанола 20 % .

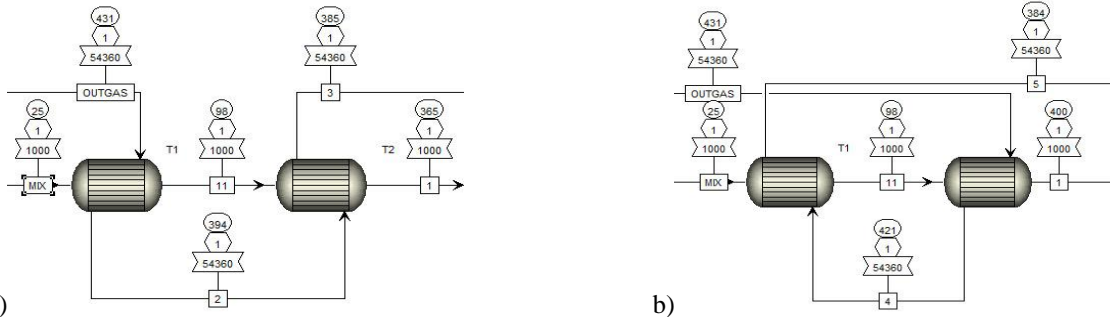


Рис. 5. Схема подключения теплообменников:
a) – ТА1 – ТА2; б) ТА2 – ТА1
Fig. 5. Connection diagram of heat-exchange equipment:
a) – ТА1 – ТА2; б) ТА2 – ТА1

ВЫВОДЫ

1. Потенциал сбросного тепла серийных газотурбинных двигателей достаточен для эффективной конверсии биоэтанола.

2. Потенциал сбросного тепла газотурбинного двигателя может обеспечивать эффективную конверсию биоэтанола при отношении мощностей ДВС и ГТД до 6.

3. При термохимической регенерации сбросного тепла газотурбинного двигателя возможно снижения расхода топлива ДВС до 20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- International energy outlook 2013. Режим доступа: [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf).
- Брагинский О.Б. 2008.** Цены на нефть: история, прогноз, влияние на экономику. Российский Химический Журнал. т. LII, № 6, 25–36.
- Носач В.Г. 1989.** Энергия топлива. Киев: Наук. думка, 148.
- Верхивкер Г.П., Абу-Ельджадаиль Кахер, Кравченко В.П. 2003.** Химическая регенерация тепла в парогазовых установках. Труды ОПУ. №3, 7.
- Носач В.Г., Шрайбер А.А. 2009.** Повышение эффективности использования биогаза в тепло-энергетических установках с помощью термохимической регенерации. Промышленная тепло-техника. №2, 57–63.
- Кучеренко О.С. 2012.** Оценка эффективности применения термохимической регенерации в ГТУ. Авиационно-космическая техника и технология, №7(94), 76–80.
- Cherednichenko O., Oschip O. 2013.** Indicators of the gas turbine unit with the thermo-chemical heat regeneration. MOTROL – Motoryzacja i energetyka rolnictwa, Lublin. vol. 15, № 2, 165–170.
- Kesser K.F., Hoffman M.A., Baughn J.W. 1994.** Analysis of a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine Power Plant. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. vol. 116, 277–284.
- Carcasci C., Facchini B., Harvey S. 1998.** Design issues and performance of a chemically recuperated aeroderivative gas turbine. Proc Instn Mech Eng. Vol. 212, Part A, 314–329.
- Хрипач Н.А. 2006.** Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива / Н.А. Хрипач, В.Ф. Каменев, В.М. Фомин, С.В. Алешин. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). №4, 45–50.
- MAN Diesel & Turbo Power Plants Programme 2013/14. Режим доступа: www.mandieselturbo.com
- F. Haglind. 2008.** Energy Conversion and Management 49, 3468–3475.
- Попырин Л.С. 1978.** Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 415.
- Ткач М.Р. 2005.** Моделирование эффективности газотурбинных энергетических установок с дополнительной камерой сгорания на базе альтернативных топлив для специализированных судов. Сб. научн. трудов УГМТУ. Николаев: УГМТУ. №2 (401), 62–70.
- Чердниченко А.К. 2014.** Оценка эффективности термохимической регенерации тепла в дизель-газотурбинной энергетической установке. Научный вестник ХДМА. Херсон: ХДМА. №2 (11). 89–96.
- Horlock H.J. 2003.** Advanced gas turbine cycles. Elsevier Inc., 203.
- Korobitsyn M.A. 1998.** New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles. Enschede: Febodruk BV, 155
- Havrysh V. 2008.** An analysis of economic efficiency of bioethanol use as a motor fuel / V.Havrysh, V.Pilip // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Lublin. Tom 10B. 2008, 44–53.
- Rass-Hansen J. 2008.** Steam reforming of technical bioethanol for hydrogen production / J.Rass-Hansen, R.Johansson, M.Moller, C.H.Christensen // International Journal of hydrogen energy. № 33, 4547–4554.
- Batista M.S. 2004.** High Efficiency Steam Reforming of Ethanol by Cobalt- Based Catalysts / M.S.Batista, R.K.S.Santos, E.M.Assaf, J.M.Assaf, E.A.Ticianelli. J. Power Sources, 134 (1), 27–32.

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF DIESEL-GAS TURBINE POWER PLANT WITH THERMO-CHEMICAL HEAT RECOVERY

Summary. This article discusses efficiency of thermochemical heat recovery of waste heat in energy complexes. Some results of research have been shown. The main aim of the research is the enlarged analysis of interrelations of thermodynamic properties of gas turbine plant with the thermochemical heat recovery and internal-combustion engine specification which operates on the conversion of fuel. 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 specific fuel oil consumption was resolved as the efficiency criterion of the unit. The analysis of the temperature potentials of waste heat of the 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 steam conversion of hydrocarbon fuel is considered. The efficiency of this scheme in operation on different fuels is determined. The results of research may be used in the development of power plants of mobile and stationary facilities. It is determined that the ethanol and butane conversion is the most effective for the disposable temperature range of exhaust gases of modern commercial gas turbine engines.

Key words: conversion of fuel; gas turbine engine, ethanol, thermochemical regeneration, fuel calorific value, specific fuel oil consumption