

УДК 621.438

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА В ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

*Чередниченко А.К.*

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев*

*В данной статье обсуждается эффективность применения термохимической регенерации сбросного тепла в энергетических комплексах, приводятся некоторые результаты исследований в этой области. Основной целью исследования является укрупненный анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерацией теплоты и характеристик двигателя внутреннего сгорания, который работает на продуктах конверсии. При математическом моделировании процессов эффективность конверсии оценивалась коэффициентом увеличения теплоты сгорания. Затраты тепла отходящих газов, необходимых для осуществления конверсии топлива, определены тепловым балансом термохимического реактора. В качестве критерия эффективности установки принят удельный расход топлива. Проведен анализ температурных потенциалов сбросного тепла среднеоборотного дизельного двигателя и газотурбинного двигателя. Предложена схема комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов путем паровой конверсии углеводородного топлива и определена ее эффективность при работе на разных топливах. 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 разработанная схема установки наиболее эффективна для этанола и бутана.*

**Ключевые слова:** конверсия топлива, газотурбинный двигатель, этанол, термохимическая регенерация тепла, теплота сгорания топлива, удельный расход топлива.

**Постановка проблемы.** Энергетические комплексы разнообразного назначения и конструктивного исполнения являются основой существующей «машинной» цивилизации. Упования на то, что при смене «индустриальной» экономики на «информационную» энергетические затраты общества существенно снизятся не имеют под собой никаких оснований. Потребности человечества в энергии для обеспечения самых разнообразных потребностей постоянно возрастают и будут возрастать. По данным, которые приведены в INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2013 [1] за последующие 30 лет (2010–2040 годы) прогнозируется увеличение мирового потребления энергии более, чем на 50 %.

Основная часть энергии добывается из невозобновляемого источника – углеводородного органического топлива, добыча которого все усложняется и, в свою очередь, требует все возрастающих энергозатрат.

Для снижения зависимости экономики от постоянно растущих цен на ископаемое углеводородное топливо, развитые страны мира развивают альтернативную энергетику, основанную на возобновляемых источниках энергии. Однако развитие технологий применения возобновляемых источников энергии и ядерной энергетики далеко не в полной мере будет компенсировать потребности человечества в энергоносителях на ближайшие десятилетия.

Потребителями ископаемого углеводородного топлива являются в той или иной мере все страны мира. География добычи тоже весьма широка – в «нефтяной клуб» входит более 100 стран. В современном мире цены на углеводородные топлива определяются на биржах из соотношения спроса и предложения, при учете влияния других факторов (политических, финансовых, технологических, состояния запасов и пр.) [2]. При этом цены ископаемых углеводородных топлив постоянно растут, что приводит к снижению эффективности энергетических установок вследствие высокой топливной составляющей общих затрат. Применение альтернативных топлив также удорожает процесс производства энергии.

В таких условиях повышение эффективности процессов преобразования энергии топлива в энергетических комплексах на базе тепловых двигателей является важной и актуальной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Исчерпание технических резервов повышения эффективности тепловых двигателей привело к стабилизации во времени величин их термического КПД.

Применение более энергоэффективных двигателей, сдерживается как существенным увеличением стоимости жизненного цикла двигателя при повышении степени его термодинамического совершенства, так и жесткими требованиями экологических стандартов, выполнение которых приводит к значительному увеличению затрат, связанных с энергопотреблением.

Современные подходы к проектированию энергетического оборудования предусматривают различные пути повышения эффективности, в том числе утилизацию и регенерацию сбросного тепла тепловых двигателей и установок, применение комбинированных установок.

Применительно к газотурбинным технологиям, утилизация тепла отходящих газов может осуществляться в регенеративных ГТД различного конструктивного исполнения, но наибольшее распространение получили когенерационные установки и хорошо известные в стационарной и судовой энергетике комбинированные газопаротурбинные циклы. В таких установках предусматривается утилизация тепла отходящих газов ГТД в паротурбинном контуре. В когенерационных установках эффективность теплогенерирующего контура тем выше, чем ниже эффективность теплового двигателя, при этом тепловая мощность может в два раза превышать вырабатываемую механическую (электрическую) мощность. Снижения расходов на водоподготовку и увеличения срока службы котла-утилизатора для таких установок можно достичь применением промежуточного водо-водяного теплообменника, при этом обеспечивается циркуляция воды, нагреваемой в котле утилизаторе по замкнутому контуру. Более перспективным видом промежуточного теплоносителя в когенерационных установках, может быть не вода, а термостойкие (диатермические) масла. Такой теплоноситель допускает достаточно высокие рабочие температуры (до 320 °С при использовании органических масел, и до 400 °С для синтетических масел), исключает проблемы связанные с химводоподготовкой, деаэрацией, подпиткой конденсата. Следует отметить, что температура отходящих газов современных серийных газотурбинных двигателей, применяемых в стационарной и судовой энергетике лежит в пределах 420...520 °С, что может ограничивать применение диатермических масел при утилизации тепла отходящих газов ГТД. Альтернативой может быть применение жидкометаллических теплоносителей [3].

В последние годы в стационарных и мобильных энергетических комплексах на базе ДВС получили распространение установки цикла DCC (Diesel Combined Cycle), в которых предусматривается утилизация тепла отходящих газов ДВС в паротурбинном цикле. Так фирма MAN Diesel&Turbo реализовала подобную схему на ряде дизель-паротурбинных электростанций. Примером может служить установка, в состав которой входит 11 ДВС 18V48/60 суммарной мощностью около 144 МВт и 1 утилизационная паровая турбина мощностью 12 МВт. За счет применения цикла DCC КПД увеличился на 3,7 % и составил 48,4 % [4].

Применительно к судовой и стационарной энергетике на базе малооборотных дизельных двигателей фирмами MAN Diesel&Turbo и Wärtsilä разработаны установки, которые работают с турбокомпаундной системой, а также установки комбинированного цикла (DCC) с турбокомпаундной системой. В таких установках предусматривается утилизация тепла масла двигателя, тепла водяной системы охлаждения рубашки двигателя и водяных контуров охлаждения наддувочного воздуха.

Одним из перспективных способов внедрения энергосберегающих технологий и использования альтернативных видов топлива, позволяющим не только улучшить экономические и экологические характеристики, но и кинетические показатели процесса сгорания, является термохимическая регенерация тепла (ТХР). При этом предусматривается конверсия базового углеводородного топлива, в результате которой образуется синтез-газ — смесь монооксида углерода и водорода, а необходимая энергия для осуществления эндотермической реакции химического превращения топлива получена при утилизации тепла отходящих газов двигателя.

**Цель работы.** 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.

Целью данного исследования является оценка возможности эффективной термохимической регенерации тепла отходящих газов газотурбинного двигателя, работающего в составе комбинированной дизель-газотурбинной установки.

**Изложение основного материала.** Представляет интерес анализ температурных потенциалов сбросного тепла таких основных энергетических машин, как среднеоборотный дизельный двигатель (СОД) и газотурбинный двигатель.

На рис. 1 сопоставлен потенциал сбросного тепла ГТД и СОД сравнимой мощности.

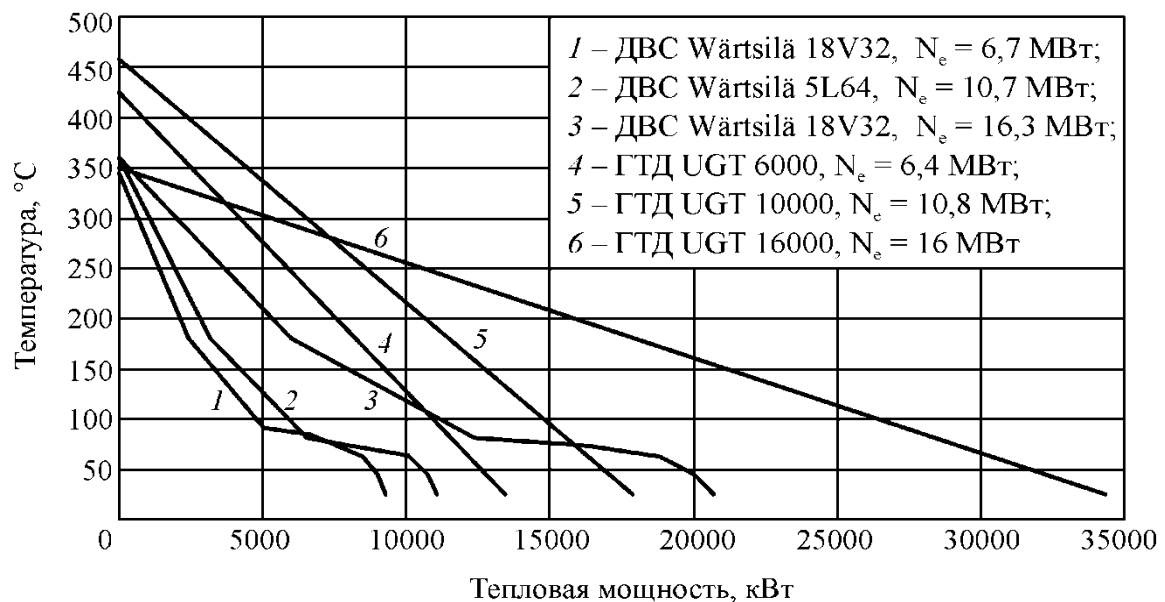


Рис. 1 – Зависимость между температурой теплоносителей и тепловой мощностью сбросного тепла для ГТД и СОД

Перспективность использования того или иного типа углеводородного топлива при термохимической регенерации может быть проанализирована по зависимости разницы теплотворной способности продуктов конверсии  $H_U^K$  и исходного топлива  $H_U^B$  от температуры реакции  $T$ . Расчет выполнен с использованием констант равновесия основных реакций при давлении 0,1 МПа. Результаты расчета обработаны методом регрессионного анализа для располагаемого диапазона температур и представлены в виде зависимостей  $\Delta H_U = f(T)$ , где  $\Delta H_U = H_U^K - H_U^B$ .

Получены следующие зависимости:

- этанол

$$\Delta H_U^o = (2,3272241 \cdot 10^{-10}) \cdot T^5 - (3,2939725 \cdot 10^{-7}) \cdot T^4 + (1,8092345 \cdot 10^{-4}) \cdot T^3 - 0,048113 \cdot T^2 + 6,231876 \cdot T - 315,9218822;$$

- бутан

$$\Delta H_U^B = (2.5375724 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 - (5.1313053 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 + (3.9415367 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 - 0.0142466 \cdot T^2 + 2.4429205 \cdot T - 159.9790408;$$

- пропан

$$\Delta H_U^P = (5.9146684 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - (1.2891662 \cdot 10^{-10}) \cdot T^5 + (1.1009637 \cdot 10^{-7}) \cdot T^4 - (4.7002096 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 + 0.0106758 \cdot T^2 - 1.2291116 \cdot T + 56.2031142;$$

- этан

$$\Delta H_U^{ЭТ} = (1.3438138 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - (2.9040517 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 + (2.2812194 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 - (7.7418685 \cdot 10^{-6}) \cdot T^3 + (9.9878204 \cdot 10^{-4}) \cdot T^2 + 0.0169935 \cdot T - 9.44105;$$

- метан

$$\Delta H_U^M = -(6.0197345 \cdot 10^{-18}) \cdot T^7 + (2.5780853 \cdot 10^{-14}) \cdot T^6 - (4.4700353 \cdot 10^{-11}) \cdot T^5 + (4.0253939 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4 - (2.0191104 \cdot 10^{-5}) \cdot T^3 + 0.0056732 \cdot T^2 - 0.830873 \cdot T + 49.1241714;$$

Полученные зависимости в дальнейшем использовались при математическом моделировании процессов в комбинированной установке с термохимической регенерацией тепла. Сопоставление результатов расчета и анализ потенциалов сбросного тепла ГТД и СОД позволяет сделать вывод, что для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных ГТД (до 450 °С) эффективна конверсия этанола, бутана, пропана и этана. Тепловой потенциал вторичных энергоресурсов ДВС дает возможность умеренной конверсии этанола, но не позволяет эффективно осуществить конверсию других углеводородов.

На рис. 2 представлена схема комбинированной дизель-газотурбинной установки (ДГТУ) с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД путем паровой конверсии углеводородного топлива, в рассматриваемом случае - биоэтанола.

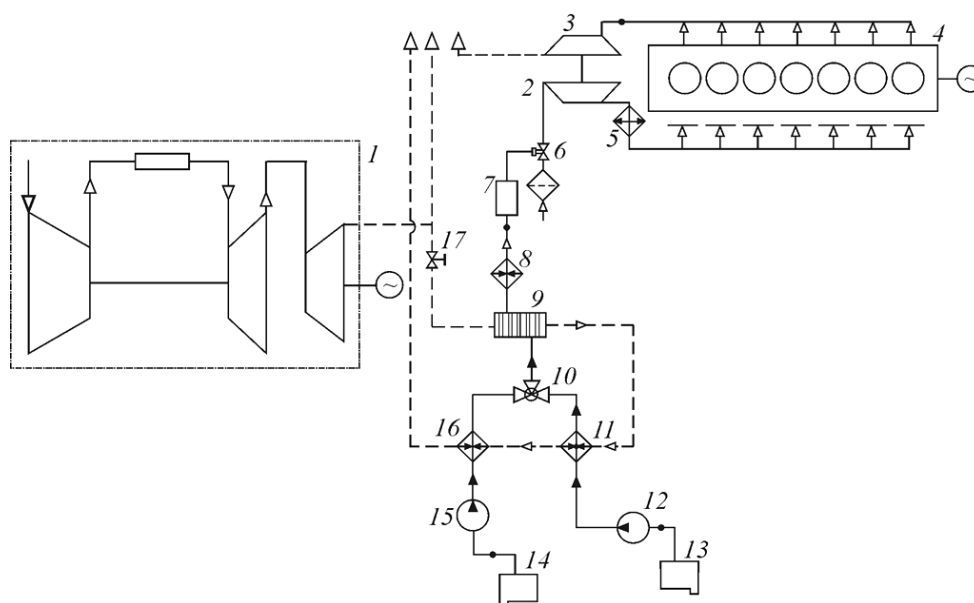


Рис. 2 – Схема ДГТУ с ТХР:

1 – ГТД; 2 – компрессор ТНА; 3 – турбина ТНА; 4 – ДВС; 5 – охладитель наддувочного воздуха; 6 – электромагнитный клапан; 7 – нейтрализатор; 8 – охладитель синтез газа; 9 – термохимический реактор; 10 – смеситель; 11 – испаритель воды; 12, 15 – насосы воды и этанола, соответственно; 13, 14 – резервуар с водой и этанолом, соответственно; 16 – испаритель этанола; 17 – клапан перепуска отработавших газов

Вода и этанол в необходимых пропорциях подается насосами (12, 15) из резервуаров (13, 14) в испарители (11, 16). В испарителях под действием тепла отработавших газов ГТД (1) происходит последовательно нагрев, испарение и перегрев до температуры начала реакции паровой конверсии. Образующиеся пары этанола и воды смешиваются в смесителе (10) и поступают в реактор (9). Под действием тепла отработавших газов ГТД, протекающих в межтрубном пространстве реактора ТХР, происходит реакция конверсии с образованием водородосодержащего газа. Затем синтез-газ поступает в теплообменник (8), где охлаждается до необходимой температуры. Водородосодержащий газ после охладителя поступает в нейтрализатор  $\text{CO}_2$  (7), откуда уже чистый водород впрыскивается через электромагнитный клапан (6) на вход в компрессор ТНА (2) и дальше вместе с воздухом подается непосредственно в цилиндры ДВС (4).

Укрупненный анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерации теплоты и характеристик ДВС, который работает на продуктах конверсии углеводородного топлива, базируется на положениях, предложенных автором в работе [5].

Изменение низшей располагаемой теплотворной способности топлива в результате эндотермической реакции конверсии учтено посредством коэффициента увеличения теплоты сгорания [5]:

$$\bar{H}_U = \frac{H_U^K - H_U^B}{H_U^B}.$$

Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора [5]:

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

где  $G_T$  – расход отходящих газов ГТД;  $c_p$  – средняя массовая изобарная теплоемкость отходящих газов в соответствующем температурном диапазоне;  $\Delta T = f(G_T, c_p, \bar{H}_U)$  – 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.

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

Методами математического моделирования исследованы характеристики газотурбинной установки на базе газотурбинного двигателя с термохимической регенерацией тепла отходящих газов (рис. 3).

Было проанализировано изменение удельного расхода топлива ДВС, при его работе в составе комбинированной дизель-газотурбинной установки (ДГТУ) с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД (рис. 4). При моделировании рассматривались установки на базе газотурбинного двигателя UGT 2500 («Зоря»–«Машпроект») мощностью  $N_e^{ГТД} = 2,8$  МВт и среднеоборотных двигателей Wärtsilä 18V32, 5L64, 18V46.

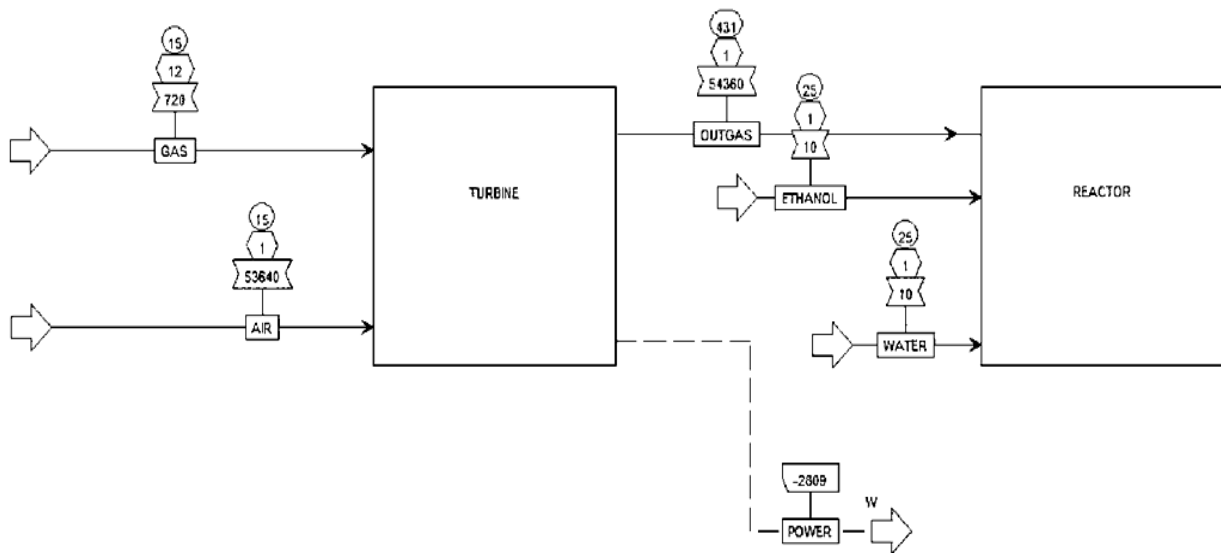


Рис. 3 – Блок-схема газотурбинной установки с ТХР

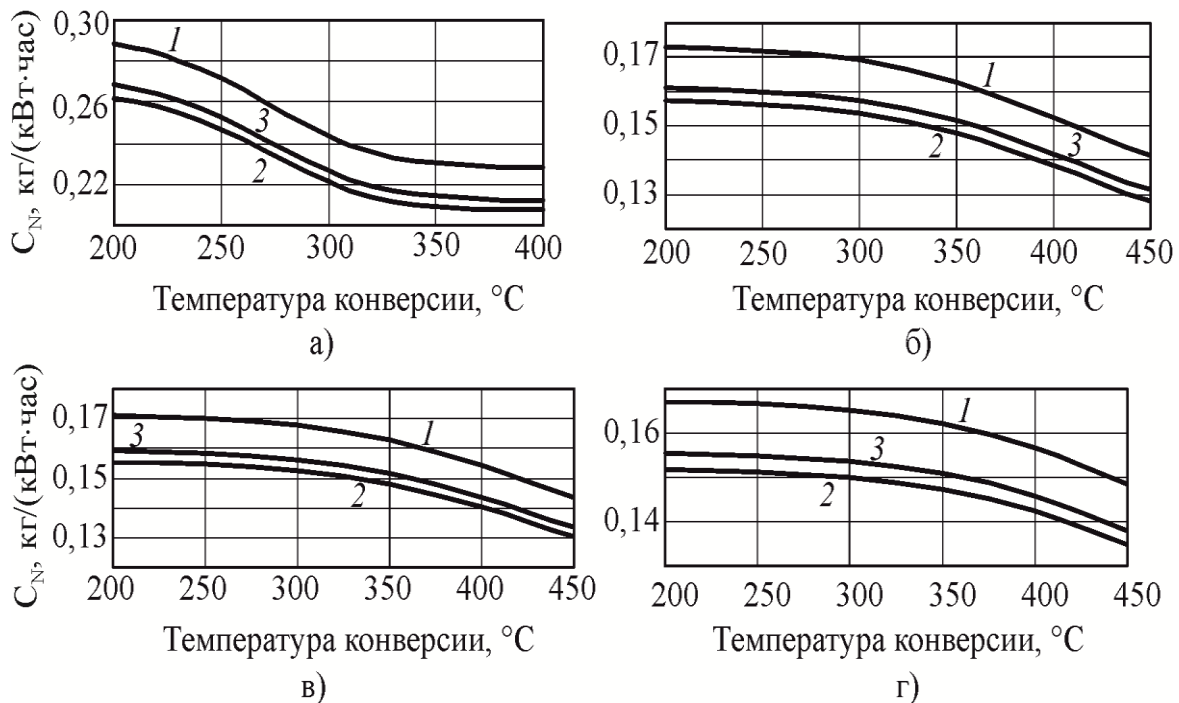


Рис. 4 – Зависимость удельного расхода топлива ДВС (1 - Wärtsilä 18V32, 2 - Wärtsilä 5L64, 3 - Wärtsilä 18V46) при работе в составе ДГТУ с ТХР от температуры конверсии. Конверсируемое топливо: а) этанол; б) бутан; в) пропан; г) этан

Как видно из полученных зависимостей (рис. 4), при температуре отходящих газов соответствующих номинальному режиму работы УГТ 2500 (~450 °С) возможна эффективная конверсия этанола и бутана (снижение удельного расхода топлива 20 и 18 % соответственно). Менее эффективна термохимическая регенерация тепла отходящих газов ГТД при конверсии пропана и бутана (16 и 12% соответственно).

Преыдущие исследования [5] показали, что конверсия метана в данном диапазоне температур неэффективна (3%).

Расчеты показывают, что теплового потенциала отходящих газов УГТ 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  $\approx 6$ . Уменьшение удельного расхода топлива для ДВС Wärtsilä 18V46 составляет для этанола (биоэтанола) до 60 г/(кВт ч), бутана до 30 г/(кВт ч), пропана до 26 г/(кВт ч), этана до 18 г/(кВт ч).

**Выводы**

1. Для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных ГТД наиболее эффективна конверсия этанола и бутана.
2. Математическое моделирование характеристик дизель-газотурбинной энергетической установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД путем конверсии углеводородного топлива позволяет сделать вывод о возможности снижения расхода топлива ДВС до 20%.
3. Потенциал сбросного тепла газотурбинного двигателя может обеспечивать эффективную конверсию углеводородного топлива при отношении мощностей ДВС и ГТД до 6.
4. Дальнейшие исследования ДГТУ с термохимической регенерацией тепла отходящих газов ГТД могут быть направлены на определение эффективности утилизации и регенерации сбросного тепла ДВС, работающего на продуктах конверсии углеводородного топлива.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. International energy outlook 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf).
2. Брагинский О. Б. Цены на нефть : история, прогноз, влияние на экономику [Текст] / О. Б. Брагинский // Российский Химический Журнал. – 2008. - Т. LII, № 6. - С. 25-36.
3. Ткач М. Р. 2011 : К выбору параметров промежуточного теплоносителя регенеративного газотурбинного цикла / М. Р. Ткач, А. К. Чередниченко // Вестник двигателестроения. – 2011 – № 2 – С. 101-105.
4. MAN Diesel & Turbo Power Plants Programme 2013/14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com).
5. Ткач М. Р. Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов [Текст] / М. Р. Ткач, А. К. Чередниченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7(64). – С. 19-22.

**Чередниченко А.К. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОХІМІЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛА В ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБІННІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ**

*У даній статті обговорюється ефективність застосування термохімічної регенерації скидного тепла в енергетичних комплексах, наводяться деякі результати досліджень у цій області. Основна мета дослідження – розширений аналіз взаємозв'язків термодинамічних параметрів газотурбинної установки з термохімічною регенерацією теплоти і характеристик двигуна внутрішнього згоряння, що працює на продуктах конверсії. При математичному моделюванні процесів ефективність конверсії оцінювалася коефіцієнтом збільшення теплоти згоряння. Витрати тепла відхідних газів, необхідних для здійснення конверсії палива визначені тепловим балансом термохімічного реактора. Як критерій ефективності установки прийнята питома витрата палива. Проведено аналіз температурних потенціалів скидного тепла середньообертового дизельного двигуна і газотурбинного двигуна. Запропоновано схему комбінованої дизель-газотурбинної установки з термохімічною регенерацією тепла відхідних газів шляхом парової конверсії вуглеводневого палива. Визначена їх ефективність під час роботи на різних паливах. Результати досліджень можуть бути використані під час проектування енергетичних установок стаціонарних та мобільних об'єктів. Встановлено, що для температурного діапазону відхідних газів сучасних серийних газотурбинних двигунів, схема установки найбільш ефективна для етанолу та бутану.*

**Ключові слова:** конверсія палива, газотурбинний двигун, етанол, термохімічна регенерація тепла, теплота згоряння палива, питома витрата палива

**Cherednichenko A.K. EVALUATION OF EFFICIENCY OF THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY IN DIESEL-GAS TURBINE POWER PLANT**

*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.*

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

© Чердніченко А.К.

Статтю прийнято  
до редакції 28.10.14