

ПОКАЗАТЕЛИ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Александр Чередниченко, Оксана Ощип

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова

54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9

Oleksandr Cherednichenko, Oksana Oschip

National University of Shipbuilding named after admiral Makarov

54025, Nikolaev, ave. Heroes of Stalingrad, 9

Аннотация. В статье приведена оценка возможности использования газотурбинного двигателя отечественного производства в составе газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла. Приведены результаты исследования методами математического моделирования показателей энергоэффективности установки.

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

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Среди направлений усовершенствования энергоустановок различного назначения и конструктивного выполнения на сегодняшний день можно выделить две основных пути – рациональное использование традиционного углеводного топлива, замена его альтернативными энергоносителями и снижение вредного действия энергоустановок на окружающую среду [1]. Особое место среди альтернативного топлива, которое может использоваться в энергетических установках, занимают водород и водородосодержащие газовые смеси (синтез-газ) [2].

Отдельной и пока недостаточно изученной проблемой является поиск возможности утилизации тепловой энергии отработанных газов за счет использования предварительно термохимического преобразования базового топлива в другой вид топлива с более высокими энергетическими возможностями [3, 4, 5].

Принципиально возможная конверсия природного газа, метана и его гомологов, традиционных жидких углеводных топлив и альтернативных топлив – этанола, метанола, диметилового эфира, твердых органических материалов, которые возможно использовать как топлива, например, низко-

сортного угля, измельченные отходы термопластичных полимеров и пр. [6, 7, 8, 9, 10].

По комплексу эффектов действия на показатели работы теплового двигателя рассмотренный способ отличается своей многофункциональностью. Направленный на повышение эффективности использования химической энергии топлива за счет снижения уровня необратимых потерь в цикле, такой способ регенерации позволяет одновременно решать задачи экологического усовершенствования рабочего процесса двигателя.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Принципы термохимической конверсии базового топлива в смесь газов с более высокой теплотворной способностью, в том числе за счет использования тепла отходящих газов газотурбинного двигателя (ГТД) для термохимической конверсии сформулированные в работе [3]. Некоторые схемы газотурбинных установок с термохимической регенерацией (CRGT¹) рассмотрены в работах [11, 12, 13, 14, 15]. Существуют разные схемы осуществления термохимической конверсии базового углеводного топлива: паровая, пароуглекислотная, парокислородная, парокислородновоздушная, парокислородноуглекислотная конверсия [16, 17, 18]. Наибольшее число работ по исследованию газотурбинных циклов с термохимической регенерацией посвящено циклам CRGT с паровой конверсией метана. Эффективность применения химической рекуперации прежде всего зависит от температуры процесса в реакторе, которая, в свою очередь, непосредственно зависит от температуры отходящих газов базового двигателя [3, 19].

Специалистами предприятия ГП НПКГ "Зоря"–"Машпроект" для оценки эффектив-

ности использования термохимической регенерации для утилизации сбросовой теплоты были рассчитаны параметры цикла и проанализированные преимущества и недостатки схем с включением термохимического реактора поочередно после блоков ГТА [20]. Анализируя представленные данные, можно сделать следующие выводы: по КПД наиболее целесообразно устанавливать термохимический реактор (ТХР) после утилизационного котла по движению отходящих газов ГТД, так как в этом случае происходит рост КПД на 4,3...6,2 % (большие значения отвечают большим T_3) в принятом диапазоне температур. Если же рассмотреть схемы с включением ТХР или за камерой сгорания, или после одной из турбин, то значительно уменьшается удельная мощность цикла вследствие значительных температурных потерь в реакторе и гидродинамических потерь через перенаправление потока газов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данной работы – оценка возможности использования газотурбинного двигателя отечественного производства в составе газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла и исследование характеристик установки.

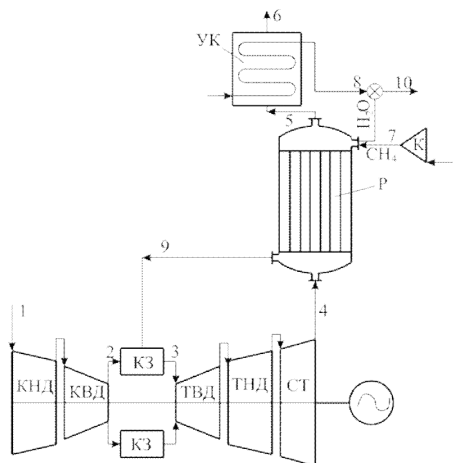


Рис. 1. Схема ГТУ из ТХР на базе двигателя UGT 25000: КНД – компрессор низкого давления; КВД – компрессор высокого давления; КЗ – камера сгорания; ТВД – турбина высокого давления; ТНД – турбина низкого давления; СТ – силовая турбина; Р – реактор; УК – утилизационный котел; К – компрессор

Fig. 1. TCR Power Plant with UGT 25000 Cycle Diagram: КНТ – LP compressor; КВТ – HP compressor; КЗ – combustor; ТВТ – HP turbine; ТНТ – LP turbine; СТ – power turbine; Р – Reformer; УК – heat recovery steam generator; К – compressor

Для анализа и оценки эффективности использования ТХР для ГТД отечественного производства был рассчитан укрупненный цикл и полученные расчетные зависимости.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для оценки возможности использования ТХР для ГТД отечественного производства был проанализирован ряд двигателей для энергетики следующих отечественных предприятий: ГП НПКГ "Зоря"–"Машпроект" и ГП "Ивченко-Прогрес". В качестве базового двигателя выбран современный ГТД UGT 25000 номинальной мощностью на клеммах электрогенератора при стандартных условиях 25 МВт.

Схема установки показана на рис. 1. Принцип работы заключается в следующем. Атмосферный воздух сжимается до определенных параметров в КНД и КВД. В камере сгорания происходит сгорание уже не традиционного топлива (в нашем случае метана), а смеси СО и H_2 . Смесь поступает из термохимического реактора, в котором за счет теплоты отходящих газов турбины происходит реакция парового риформинга и топливная смесь подогревается. На выходе из реактора температура отходящих газов имеет достаточный потенциал для получения в утилизационном котле пара, необходимого для подачи в реактор. Основные параметры сред в цикле представлены на рис. 1.

Обозначение потока на схеме	Температура среды, К	Массовая затрата среды, кг/с
1 (воздух)	288	86,91
2 (воздух)	690	86,91
3 (газы)	1450	90
4 (газы)	773	90
5 (газы)	738	90
6 (газы)	443	90
7 (метан)	415	1,454
8 (пар)	508	1,646
9 (синтез-газ)	700	3,1
10 (пар)	508	5,524

ГТД выбирается с высоким потенциалом отходящих газов, т. е. с большим количеством сбросной теплоты.

Исходные данные для проведения расчетов приведены ниже.

Температура окружающей среды	288 К
Давление окружающей среды	0,1013 МПа
Влажность воздуха	60 %
КПД роторов	0,995
Допустимая температура лопаток турбины	1080 К
Коэффициент полноты сгорания КС	0,99
Адиабатический КПД степени турбины	0,88

КПД турбин при разных температурах будет иметь разные значения:

T_3 , К	1273	1373	1473	1573	1673	1773
КПД	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84
тнд						
КПД	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
твд						

Применение термохимической регенерации топлива с помощью парового риформинга приводит к следующим изменениям в базовом цикле:

1. Увеличение потерь полного давления на выходе из турбины за счет потерь полного давления в реакторе.

2. Увеличение количества рабочего тела за счет подачи воды в камеру сгорания.

3. Утилизация теплоты отходящих газов за счет нагревания топлива и пара до температуры конверсии и следующей подачи в камеру сгорания.

4. Утилизация тепла отработавших газов за счет отбора тепла в термохимический реактор в результате эндотермических реакций.

Увеличение потерь полного давления на выходе из силовой турбины за счет потерь полного давления в термохимическом реакторе приводит к уменьшению КПД от 0,6 до 0,8 % (абсолютных) и уменьшению удельной мощности от 1,6 до 2,2 %. Причем большие значения отвечают меньшим числам T_3 .

При расчете термохимического реактора, который по тепловой схеме находится сразу за ГТД, определяющим параметром является температура отходящих газов двигателя. В зависимости от этого получались разные составы для исходной смеси, и, соответственно, изменялась теплотворная способность полученного синтеза-газа. В табл. 1

показаны состав смеси ("сухого" газа) в зависимости от температуры процесса, а также теплотворная способность продуктов конверсии.

Таблица 1. Исходные продукты для процесса парового реформинга

Table 1. The starting products for the steam TCR

Составляющие смеси	Температура процесса в реакторе, К				
	700	800	900	1000	1100
	Процентное содержание компонента в смеси, %				
H ₂	11,62	22,17	34,47	46,77	57,55
CO	0,04	0,43	2,2	6,78	13,28
CO ₂	2,87	5,22	6,96	6,61	4,43
CH ₄	85,47	72,18	56,37	39,84	24,74
Теплотворная способность газа, кДж/м ³	32010	28420	24290	20259	16824
Теплотворная способность газа, кДж/кг	56667	62731	69730	76550	82381
Объем "сухого" газа на единицу объема базового топлива	1,131	1,285	1,526	1,879	2,356

В табл. 2 приведены исходные данные для полученных расчетных зависимостей. Прирост КПД в каждом случае приводится для простого цикла. На рис. 2 представлены расчетные зависимости для КПД циклов при учете тех или других условий.

Графики на рис. 2 свидетельствуют о тенденции роста КПД при использовании термохимической регенерации в сравнении с обычным циклом. В расчете данного КПД не учитывается уменьшение внутренних потерь в камере сгорания, которые получаются при сжигании предварительно разложенного на более простые компоненты углеводородного топлива. Более точно оценить влияние предыдущей диссоциации на процесс горения и на эффективность использования ТХР в цикле может дать эксергетический расчет.

Кривые 3 и 4 показывают значительный прирост КПД при учете впрыскивания воды в камеру сгорания (от 1,71...1,97 до

4,66...5,60 %), т. е. можно провести аналогию с циклом STIG. Несомненным преимуществом ТХР есть то, что низкопотенциальный газ способен в большей степени стабилизировать горение, чем паро-топливная смесь, которую получают в цикл STIG.

В результате проведения эндотермических реакций в отходящих газах отбирается количество теплоты, необходимое для подогревания газо-паровой смеси и проведения

этих реакций. В конкретном расчете для двигателя UGT 25000 при заданных параметрах количество поглощенной теплоты – $q_{рег} = 3418$ кВт. Таким образом, частица регенерированной теплоты составляет 29 % от теплоты отходящих газов. В общем тепловом балансе данный вид регенерации позволяет уменьшить часть базового топлива на 4,93 % (рис. 3).

Таблица 2. Результаты расчетов для UGT 25000

Table 2. Modeling results of UGT 25000

Исходные данные		Простой цикл ГТД (кривая 1)		Цикл ГТУ с ТХР (без учета впрыскивания пара) (кривая 2)			
		Параметр					
π_k	T_3, K	$\eta_e, \%$	$N_e^{num},$ кВт/(кг/с)	$\eta_e, \%$	$N_e^{num},$ кВт/(кг/с)	Прирост КПД, %	
20	1273	34,16	209,50	34,42	206,90	0,26	
25	1373	35,56	231,03	35,92	227,72	0,36	
30	1473	36,28	271,40	36,82	267,30	0,54	
30	1573	37,15	310,00	37,84	305,00	0,69	
35	1673	37,73	339,02	38,57	333,00	0,84	
35	1773	38,32	367,80	39,26	360,00	0,94	
Исходные данные		Цикл ГТУ (с учетом впрыскивания пара) (кривая 3)			Цикл ГТУ с ТХР (кривая 4)		
		Параметр					
π_k	T_3, K	$\eta_e, \%$	$N_e^{num},$ кВт/(кг/с)	Прирост КПД, %	$\eta_e, \%$	$N_e^{num},$ кВт/(кг/с)	Прирост КПД, %
20	1273	35,87	247,37	1,71	36,13	245,65	1,97
25	1373	39,17	297,88	3,61	39,53	295,93	3,97
30	1473	40,07	356,61	3,79	40,61	354,17	4,33
30	1573	41,23	408,892	4,08	41,92	406,09	4,77
35	1673	42,29	498,34	4,56	43,13	495,22	5,40
35	1773	42,98	547,21	4,66	43,92	543,56	5,60

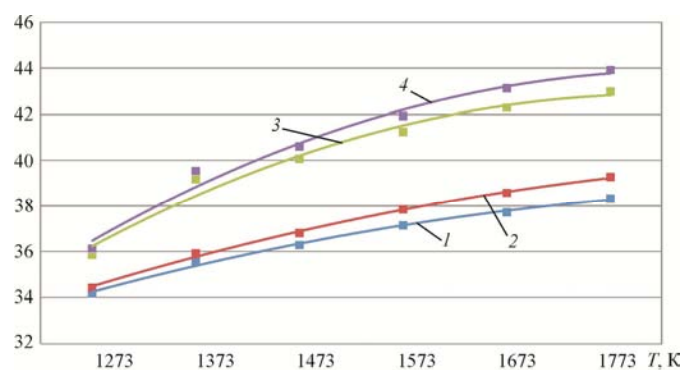


Рис. 2. Зависимости КПД от температуры за камерой сгорания T_3 : 1 – простой цикл; 2 – цикл с ТХР (без учета впрыска пара); 3 – цикл с учетом впрыска пара; 4 – цикл с ТХР

Fig.2 Parameters of efficiency as a function of temperature of the combustion chamber T_3

1 – simple cycle, 2 – cycle with TCR (without steam injection), 3 – STIG, 4 – cycle with TCR

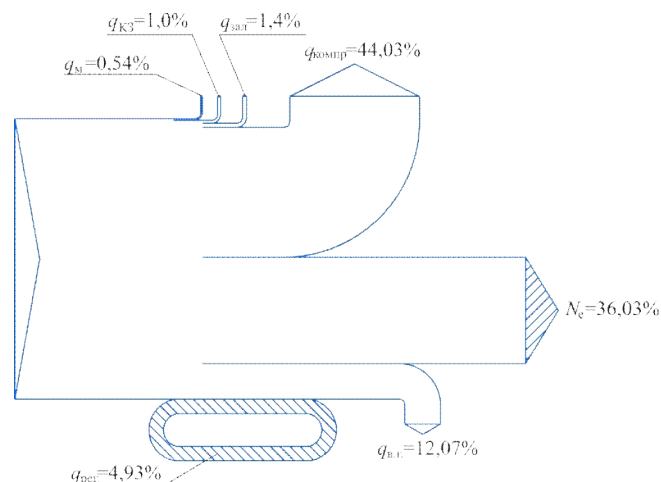


Рис. 3. Диаграмма Грассмана для цикла ГТД с ТХР
Fig.3 Grassmann diagram of an TCR power plant

ВЫВОДЫ

Полученные методами математического моделирования показатели энергоэффективности ГТУ с ТХР показывают, что при существующем уровне температур газов за камерой сгорания ГТД термохимическая конверсия метана недостаточно эффективная и сравнима по своим результатам с циклом STIG. Несомненным преимуществом ТХР есть то, что водородосодержащий газ способен в большей мере стабилизировать горение, чем паротопливная смесь, которую получают в результате цикла STIG. По данным расчетов, рост КПД наблюдается в пределах от 1,97 до 5,60 %, причем большие значения отвечают большим температурам за камерой сгорания, а, соответственно, и большей степени конверсии в термохимическом реакторе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Moiseev I. 2006. Alternativnye istochniki organicheskikh topliv / I. Moiseev, N. Platje, S. Varfolomeev // Vestnik RAN. — № 5. — 427-437.
2. Vodorod v dvigateljah gazoturbinogo tipa i jenergotehnologicheskikh ustanovkakh / P. Kanilo, V. Solovej, V. Kostjuk, K. Kostenko // Problemy mashinostroenija. — 2007. — 10, № 4. — 26–32.
3. Nosach V. 1989. Jenergija topliva / V. Nosach. — K.: Nauk. dumka, — 148.
4. Korabel'nikov A. 2006. Himicheskaja regeneracija tepla i preobrazovanija topliva v jenergeticheskikh ustanovkakh / A. Korabel'nikov, A. Kuranov, S. Ryzhikov // Elektronne vidannja — Rezhim dostupu: www.chemphys.edu.ru/pdf/-10-12-002.pdf.
5. Verhivker G. 2003. Himichna regeneracija tepla u parogazovih ustanovkakh / G. Verhivker, Abu-El'dzhadail' Kaher, V. Kravchenko / Trudy OPU — №3 – 7.
6. Nosach V. 2009. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija biogaza v teplojenergeticheskikh ustanovkakh s pomoshh'ju termohimicheskoj regeneracii / V. Nosach, A. Shrajber // Promyshlennaja teplotehnika. — № 2. — 57–63.
7. Tret'jakov V. 2006. Biojetanol – syr'e dlja poluchenija komponentov motornyh topliv i neftehimicheskikh produktov / V. Tret'jakov, T. Mastjunina, A. Lermontov, T. Burdejnaja // Kataliz v promyshlennosti. — T. 2, № 4. — 12–17
8. Rass-Hansen J. 2008. Steam reforming of technical bioethanol for hydrogen production / J. Rass-Hansen, R. Johansson, M. Moller, C. Christensen // International Journal of hydrogen energy. — № 33. — 4547–4554.
9. Havrysh V. 2008. An analysis of economic efficiency of bioethanol use as a motor fuel / V. Havrysh, V. Pilip // Motrol. Motoryzacija i energetyka rolnictva. — Lublin. — Tom 10B. — 44–53.
10. Timoshevskij B. 2011. Motornye topliva iz polimernogo syr'ja: proizvodstvo i primenenie / B. Timoshevskij, M. Tkach. — K.: Den' pechati, — 290.
11. Korobitsyn M. 1998. New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles / M. Korobitsyn. — Enschede : Febodruk BV. — 155.

12. Horlock H. 2003. Advanced gas turbine cycles / H. Horlock – Elsevier Inc., – 203.
13. Nosach V. 2009. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija biogaza v teplojenergeticheskikh ustanovkah s pomoshh'ju termohimicheskoj regeneracii / V. Nosach, A. Shrajber // Promyshlennaja teplotehnika. – T. 31, № 2. – 57–63.
14. Tkach M. 2009. Jeffektivnost' gazoturbinnoj ustanovki s termodinamicheskoj i termohimicheskoj regeneraciej tepla othodjashhih gazov / M. Tkach, A. Cherednichenko // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. — № 7 (64). – 19–22.
15. Cherednichenko A. 2012. Jeksperimental'naja baza dlja issledovanija konversii biojetanola regeneraciej sbrosnogo tepla gazoturbinnogo dvigatelja / A. Cherednichenko, M. Tkach // Motrol motoryzacija i energetyka rolnictva. – Tom 14, № 2, – 21–25.
16. Aratjunov V. 1998. Okislitel'nye prevrashhenija metana / V. Aratjunov, O. Krylov – M.: Nauka, – 361.
17. Krylov O. 2000. Uglekislotnaja konversija metana v sintez-gaz / O. Krylov // Rossijskij himicheskij zhurnal, T. 44, №1, 19–33.
18. Pashhenko D. 2010. Opredelenie maksimal'noj stepeni konversii metana produktami polnogo sgoranija prirodnogo gaza / D. I. Pashhenko // Vestnik SGTU, № 3, 143–150.
19. Cherednichenko A. 2010. Ob jeffektivnosti termohimicheskoj regeneracii tepla v gazoturbinnih ustanovkah mobil'nyh jenergokompleksov/ A. K. Cherednichenko // Elektronne vidannja "Visnik Nacional'nogo universitetu korablebuduvannja". – Mikolaïv: NUK. – № 1. – <http://ev.nuos.edu.ua>.

INDICATORS OF THE GAS TURBINE UNIT WITH THE THERMO-CHEMICAL HEAT REGENERATION

Summary. This article provides an evaluation of the possibility of domestically produced gas turbine engine usage within the gas turbine unit with thermo-chemical heat regeneration. The results of the study of energy performance indicators by the mathematical modeling are presented.

Key words: gas turbine engine, thermo-chemical regeneration of heat, conversion of fuel, alternative fuel, parameters of efficiency