

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЗА СЧЕТ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА

Кузьмичёв В.С.* , Омар Х.Х. , Ткаченко А.Ю.*****

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

** e-mail: kuzm@ssau.ru*

*** e-mail: dr.hewa.omar@gmail.com*

**** e-mail: tau@ssau.ru*

Одним из направлений совершенствования цикла газотурбинных установок (ГТУ), позволяющим повысить их эффективность, является регенерация тепла выхлопных газов путем установки теплообменника на выходе из турбины, в котором часть тепла передается воздуху за компрессором. Комплексная оптимизация параметров термодинамического цикла ГТУ, таких, как температура газа перед турбиной T_T^* , степень повышения давления в компрессоре $\pi_{к\sigma}^*$, а также параметров, определяющих рабочий процесс дополнительных узлов (регенераторов тепла, паровой турбины и др.) комбинированной установки, играет важную роль в повышении ее эффективности. Разработанные в САЕ-системе АСТРА компьютерные модели ГТУ с комбинированными термодинамическими циклами позволили реализовать решение задач нелинейной многокритериальной оптимизации параметров их рабочего процесса, определить наиболее рациональные схемы в зависимости от целевого назначения и условий эксплуатации ГТУ. В качестве критерия оптимизации принят эффективный КПД. В статье приведены результаты исследования влияния на эффективный КПД ГТУ параметров рабочего процесса и степени регенерации тепла выхлопных газов, а также влияние степени регенерации на области оптимальных по эффективному КПД значений T_T^* и $\pi_{к\sigma}^*$.

Ключевые слова: газотурбинная установка, регенерация тепла, параметры рабочего процесса, схема, эффективный КПД, термодинамический цикл, оптимизация.

Введение

Требования к повышению эффективности наземных газотурбинных установок постоянно возрастают. Преобразование тепла в работу в газотурбинных двигателях, работающих по циклу Брайтона, сопровождается большими потерями, которые зависят от параметров цикла и достигают 60...70% и более. В настоящее время широкое применение в качестве наземных газотурбинных установок находят конверсионные высокотехнологичные авиационные двигатели и их модификации, предусматривающие повышение эффективности ГТУ на основе применения комбинированных термодинамических циклов [1, 2, 6, 7].

Очевидно, что основные параметры термодинамического цикла ГТУ, такие, как температура газа перед турбиной T_T^* и степень повышения давления

в компрессоре $\pi_{к\sigma}^*$, а также параметры, определяющие рабочий процесс дополнительных узлов (регенераторов тепла, паровой турбины и др.) комбинированной установки играют важную роль для повышения ее эффективности. Исследованию влияния параметров термодинамических циклов на эффективность газотурбинных двигателей посвящены работы российских [1, 3—6], а также зарубежных [12—18] ученых. Однако, несмотря на многочисленные работы по поиску путей повышения эффективности газотурбинных двигателей и энергетических установок [1, 4, 6, 8, 9, 10, 11], вопросы комплексной оптимизации параметров ГТУ со сложными, комбинированными циклами исследованы не в полной мере. Рассмотрим различные схемы ГТД с комбинированными циклами.

ГТД с регенерацией тепла выхлопных газов

Одним из направлений совершенствования цикла ГТД является регенерация тепла выхлопных газов. Попытки такой регенерации предпринимались и на авиационных ГТД (например, на турбовинтовых двигателях (ТВД) фирмы «Аллисон») путем установки теплообменника на выходе из турбины, в котором часть тепла передавалась воздуху за компрессором.

Теплообменник — это устройство, используемое для передачи тепла между двумя или более жидкостями. Жидкости могут быть разделены твердой стенкой для предотвращения смешивания, или они могут находиться в непосредственном контакте. Для передачи тепла у жидкостей должна быть разная температура и они должны иметь тепловой контакт. Согласно второму закону термодинамики, тепло может течь только от более горячих жидкостей к более холодным. Теплообменники классифицируются по разным категориям в зависимости от типа процесса переноса, количества жидкостей, устройств подачи и механизмов теплообмена [20, 21].

Однако относительная громоздкость и значительная масса теплообменника (даже пластинчатого типа) не позволяют активно использовать эту схему в авиации в настоящее время. В наземных установках возможности для полезного использования тепла выхлопных газов весьма широкие, и они активно реализуются при конверсии ГТД, в том числе непосредственно в цикле двигателя для повышения его эффективного КПД. В схемах ГТД с регенерацией тепла выхлопных газов (рис. 1) воздух из компрессора двигателя поступает в теплообменник. В случае наземных ГТУ теплообменники, как правило, трубчатые и располагаются в выхлопной шахте за силовой турбиной. Чаще применяются теплообменники перекрестного хода, одно- или многоходовые с общим направлением теплоноси-

телей навстречу друг другу. В настоящее время используются трубчатые и пластинчатые теплообменники. Степень регенерации в наиболее широко применяемых трубчатых теплообменниках составляет $\theta = 0,8...0,9$, а пластинчатые теплообменники характеризуются степенью регенерации $\theta = 0,5...0,8$.

На рис. 2 показана схема цикла регенерации тепла и его характеристика на диаграмме T-S. В теплообменнике более горячие выхлопные газы отдают часть своего тепла более холодному воздуху за компрессором. Из теплообменника нагретый воздух поступает на вход в камеру сгорания. В результате количество топлива, потребное для нагрева воздуха до температуры T_T^* , уменьшается, а эффективный КПД двигателя повышается. Этот эффект зависит от располагаемого перепада температур $\Delta T_{\text{рас}}^* = T_T^* - T_K^*$ (разности температур за свободной турбиной и за компрессором) и от степени регенерации теплообменника θ :

$$\theta = \frac{\Delta T_{\text{рег}}^*}{\Delta T_{\text{рас}}^*} = \frac{\Delta T_{\text{рег}}^*}{T_T^* - T_K^*}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{рег}}^* = T_3^* - T_K^*$ — подогрев закомпрессорного воздуха в теплообменнике.

Из выражения (1) следует, что подогрев закомпрессорного воздуха $\Delta T_{\text{рег}}^*$ зависит от температуры газа за турбиной, а следовательно, от T_T^* и от температуры воздуха за компрессором T_K^* , а следовательно, от π_K^* .

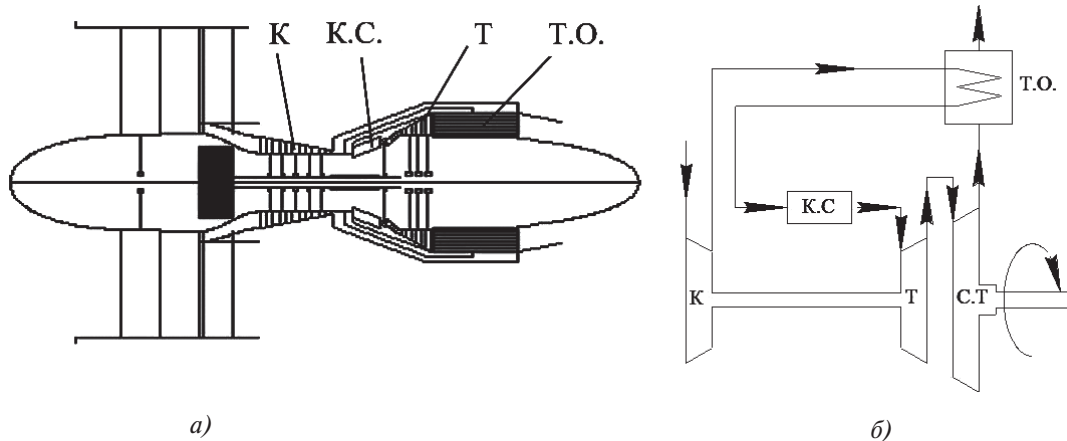


Рис. 1. Схема ГТД с регенерацией тепла выхлопных газов: а — авиационный ГТД; б — наземная ГТУ; Т.О. — теплообменный аппарат; К.С. — камера сгорания; К — компрессор; Т — турбина; С.Т. — силовая турбина

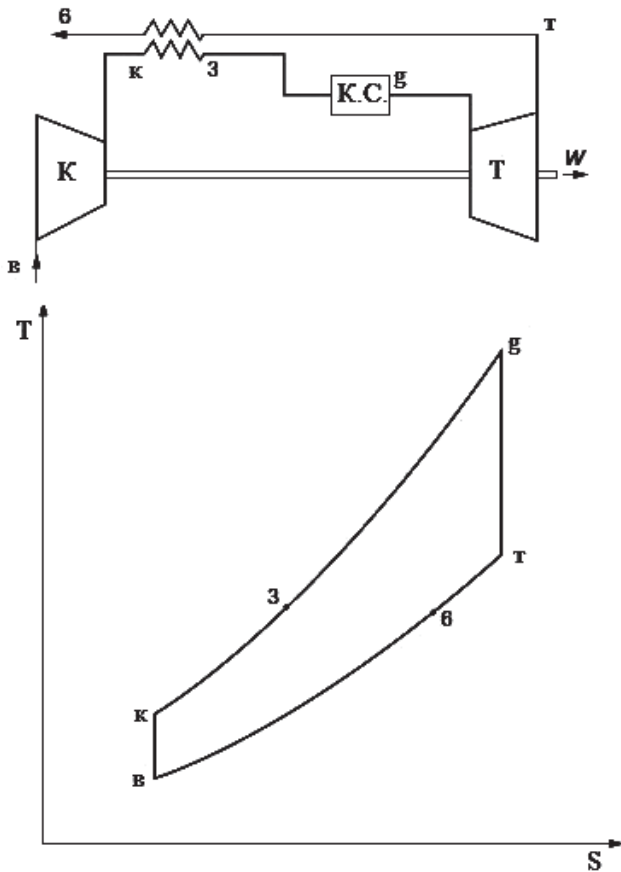


Рис. 2. Цикл газовой турбины с регенерации тепла в T-S-диаграмме

С увеличением температуры газа перед турбиной T_{Γ}^* и уменьшением степени повышения давления π_{κ}^* подогрев $\Delta T_{\text{рег}}^*$ (эффект от регенерации) повышается. Поэтому «чистый» выигрыш от регенерации (при прочих равных условиях, в том числе при произвольно принятых исходных параметрах рабочего процесса) очевиден: он тем больше, чем выше T_{Γ}^* и меньше T_{κ}^* , а также чем выше степень регенерации. Однако при снижении π_{κ}^* снижается работоспособность рабочего тела и уменьшается его эффективный КПД. Поэтому при выборе параметров рабочего процесса двигателя с регенерацией тепла (особенно при проектировании его на базе уже имеющегося ГТД) необходимо решать задачу оптимизации параметров с учетом регенерации тепла.

За основу для исследования влияния регенерации тепла на эффективный КПД как прототип выбран двигатель ТРДДФ РД-33, и для конвертации его в наземную энергоустановку был подрезан компрессор низкого давления (КНД), для ликвидации второго контура. Были приняты следующие значения варьирования основных термодинамических

параметров цикла: $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 15, 30, 45, 60$ и $T_{\Gamma}^* = 1200, 1500, 1800, 2100$ К). С помощью компьютерной программы АСТРА разработан модуль ГТД без регенерации тепла выхлопных газов и ГТД с регенерацией тепла выхлопных газов, и в статье в качестве примера приведены некоторые результаты исследования по повышению эффективности ГТД.

Результаты расчета ГТД без регенерации тепла выхлопных газов

На рис. 3 показаны зависимости эффективно-го КПД газотурбинного двигателя без регенерации тепла от температуры газа T_{Γ}^* и степени повышения давления $\pi_{\kappa\Sigma}^*$. Увеличение степени повышения давления повышает общий КПД при заданной температуре горения, однако увеличение степени повышения давления за пределами определенного значения при любой заданной температуре горения может фактически привести к снижению общей эффективности цикла. Следует также отметить, что очень высокие степени повышения давления, как правило, уменьшают рабочий диапазон турбокомпрессора.

В некоторых случаях это может привести к помпажу компрессора, что, в свою очередь, может привести к срыву пламени или даже серьезному повреждению и разрушению лопаток компрессора и радиальных и упорных подшипников газовой турбины [18]. Как видно из рис. 3, с увеличением температуры T_{Γ}^* от 1200 до 2100 К эффективный КПД η_e увеличивается от 22 до 48% при $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 60$ и при $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 15$ — от 36 до 38%. Поэтому можно сказать, что при $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 15$ невыгодно увеличивать температуру газа для получения большего КПД.

Из рис. 3 можно сделать вывод, что в газотурбинном двигателе без регенерации тепла выхлопных газов получить высокие КПД можно только при высоких параметрах цикла ($\pi_{\kappa\Sigma}^* > 15$ и $T_{\Gamma}^* > 1500$ К).

Результаты расчета ГТД с регенерацией тепла выхлопных газов

Из рис. 4 следует, что в ГТД с регенерацией тепла с ростом $\pi_{\kappa\Sigma}^*$ эффективный КПД не повышается (как было показано на рис. 3 для ГТД без регенерации тепла), а наоборот, снижается. Например, при $T_{\Gamma}^* = 1500$ К и увеличении $\pi_{\kappa\Sigma}^*$ от 15 до 60 КПД уменьшается от 45 до 28.

Это влияние можно объяснить снижением предполагаемой разности температуры $\Delta T_{\text{рас}}^* = T_3^* - T_{\kappa}^*$,

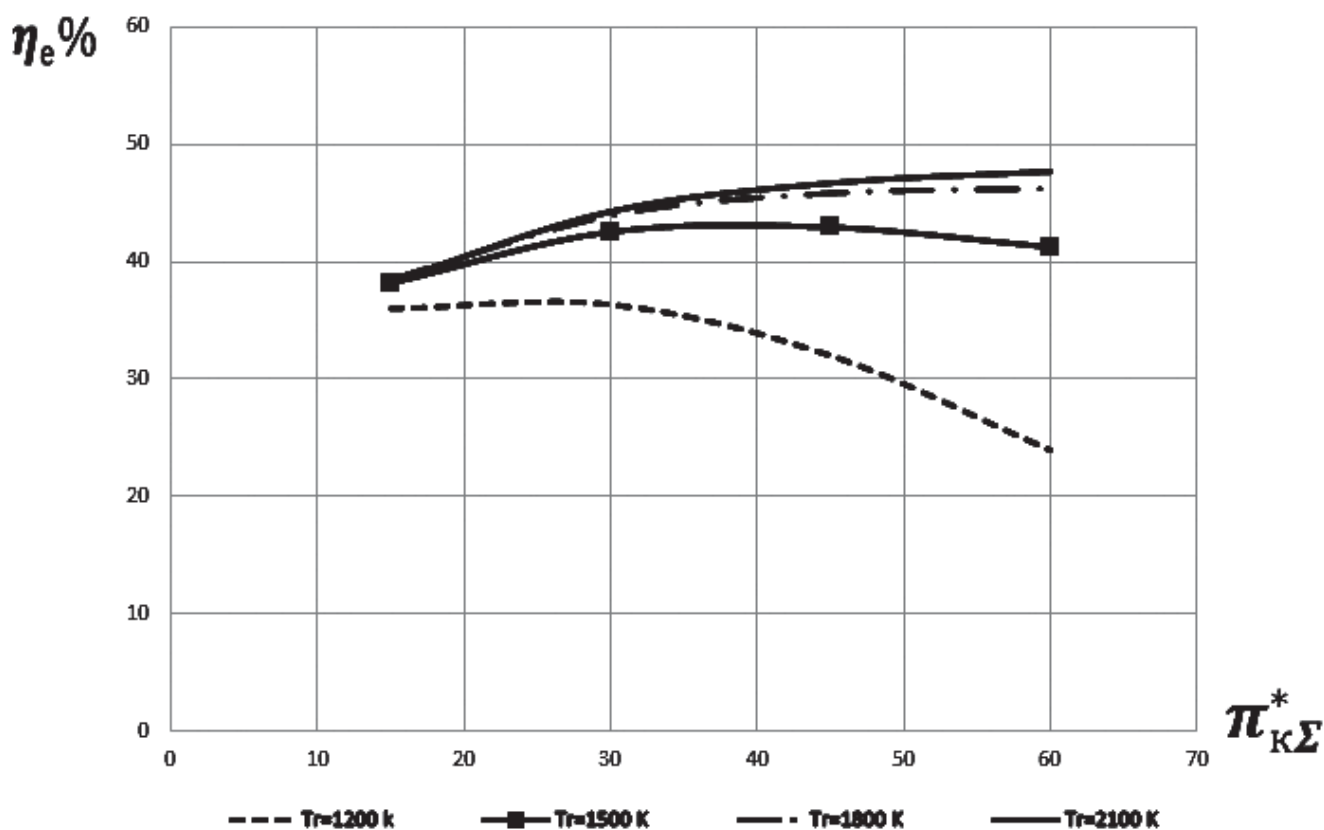


Рис. 3. Зависимости эффективного КПД ГТД без регенерации тепла от температуры газа T_g^* и степени повышения давления $\pi_{k\Sigma}^*$

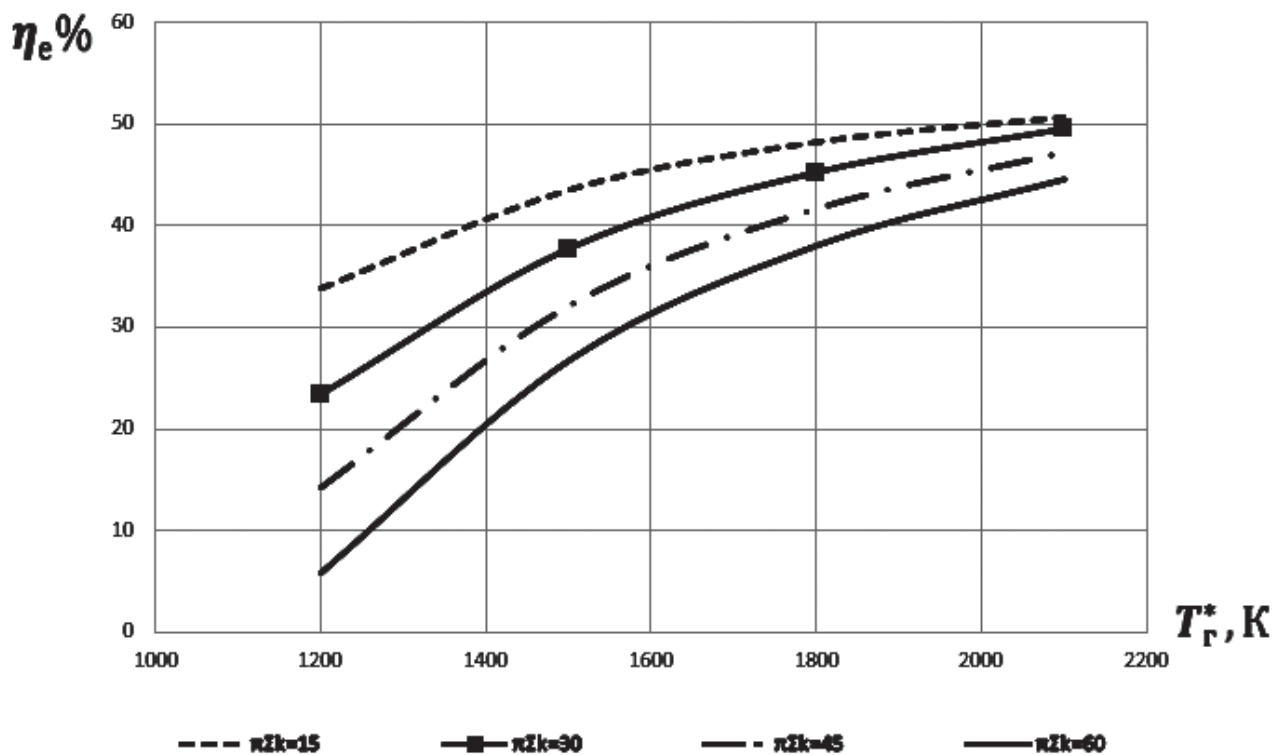


Рис. 4. Зависимости эффективного КПД ГТД с регенерацией тепла от температуры газа T_g^* и степени повышения давления $\pi_{k\Sigma}^*$

которая играет важную роль. Чем ниже T_{Γ}^* и выше $\pi_{\kappa\Sigma}^*$, тем меньше располагаемая разность $\Delta T_{\text{рас}}^*$. На рис. 5 приведена разность температуры $\Delta T_{\text{рас}}^* = T_3^* - T_{\kappa}^*$. Она изменяется от 1100 К (при $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 15$ и $T_{\Gamma}^* = 2100$ К) до отрицательной величины -500 К (при $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 60$ и $T_{\Gamma}^* = 1200$ К). Выше границы (пунктирная линия) располагается область значений параметров, в которой генерация тепла

эффективна, ниже — область, где она не имеет смысла.

Таким образом, два противоположных фактора влияют на эффективность ГТД с регенерацией тепла при снижении $\pi_{\kappa\Sigma}^*$: эффективность самого двигателя снижается при снижении $\pi_{\kappa\Sigma}^*$, а эффективность регенерации значительно увеличивается (как показано на рис. 6). Поэтому для ГТД с регенера-

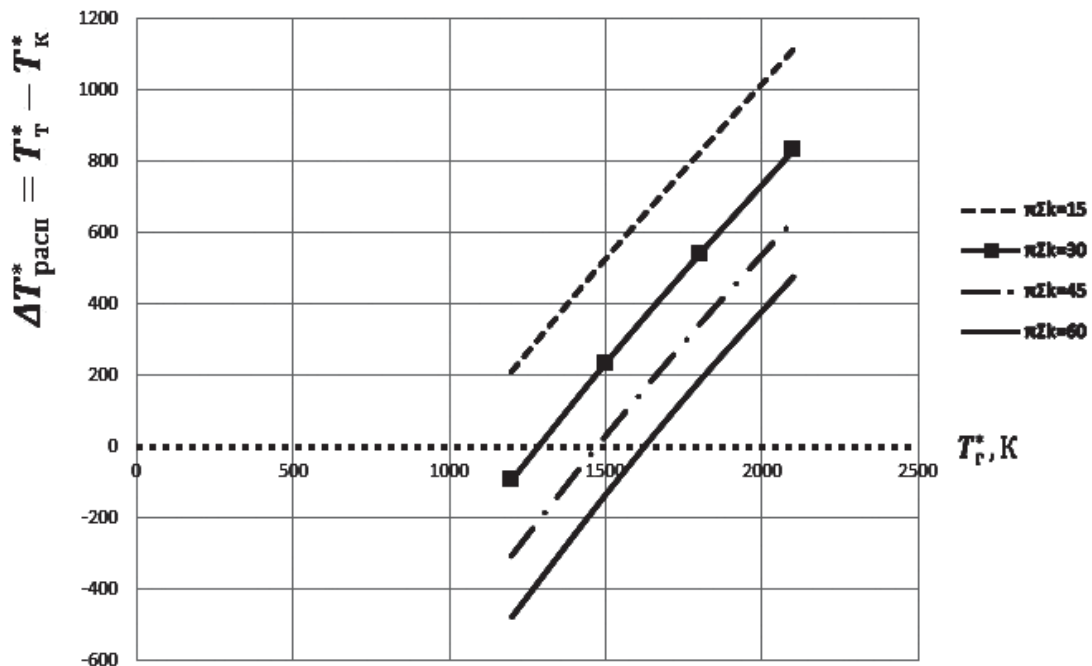


Рис. 5. Зависимости разности температуры $\Delta T_{\text{рас}}^*$ от температуры газа T_{Γ}^* и степени повышения давления $\pi_{\kappa\Sigma}^*$

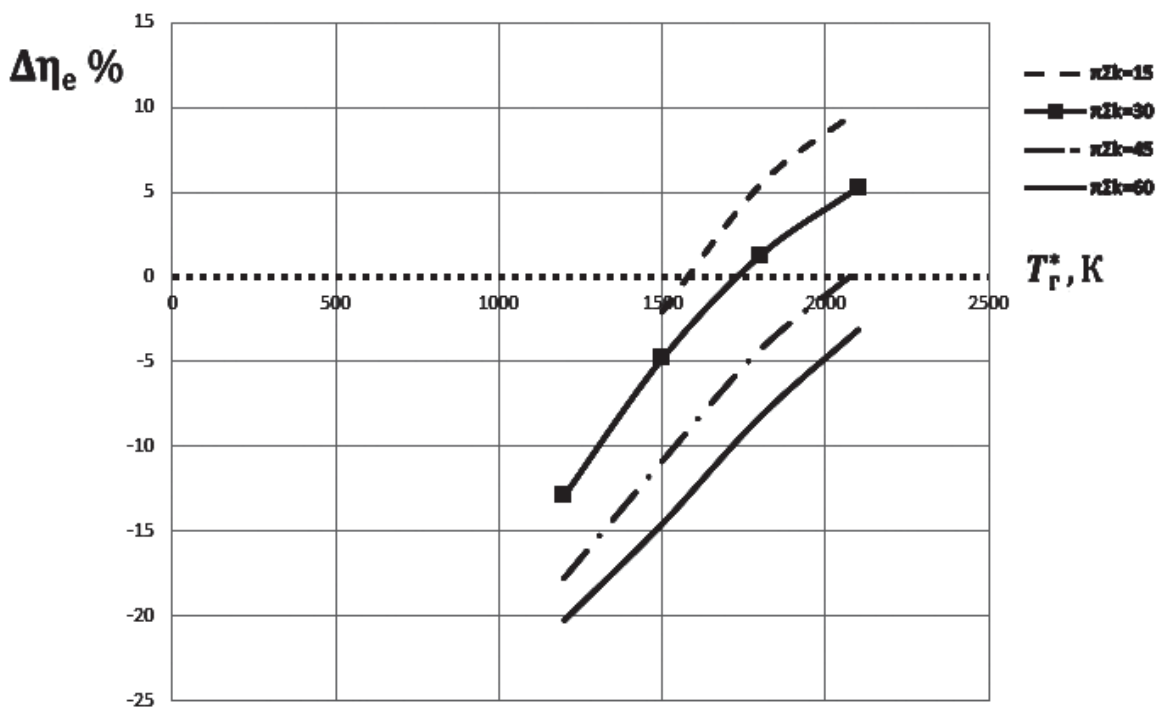


Рис. 6. Разности между эффективным КПД двигателей с регенерацией тепла и без регенерации тепла выхлопных газов

цией тепла необходимо оптимизировать степень повышения давления $\pi_{к\sigma}^*$ и температуру газа $T_{г}^*$.

На рис. 7 показано оптимальное значение КПД при разных степенях повышения давления $\pi_{к\sigma}^*$, температурах газа $T_{г}^*$ и степени регенерации θ . Как видно из рис. 7, оптимальная степень повышения давления в двигателе с регенерацией тепла меньше, чем в двигателе без регенерации тепла.

КПД на ГТД без регенерации тепла можно получить только при высоких параметрах цикла ($\pi_{к\sigma}^* = 30 \dots 60$ и $T_{г}^* = 1600 \dots 2000$ К). Поэтому цикл с регенерацией тепла выхлопных газов достаточно эффективен только при относительно низких значениях $\pi_{к\sigma}^*$ ($\pi_{к\sigma}^* < 15$), например в двигателях не-

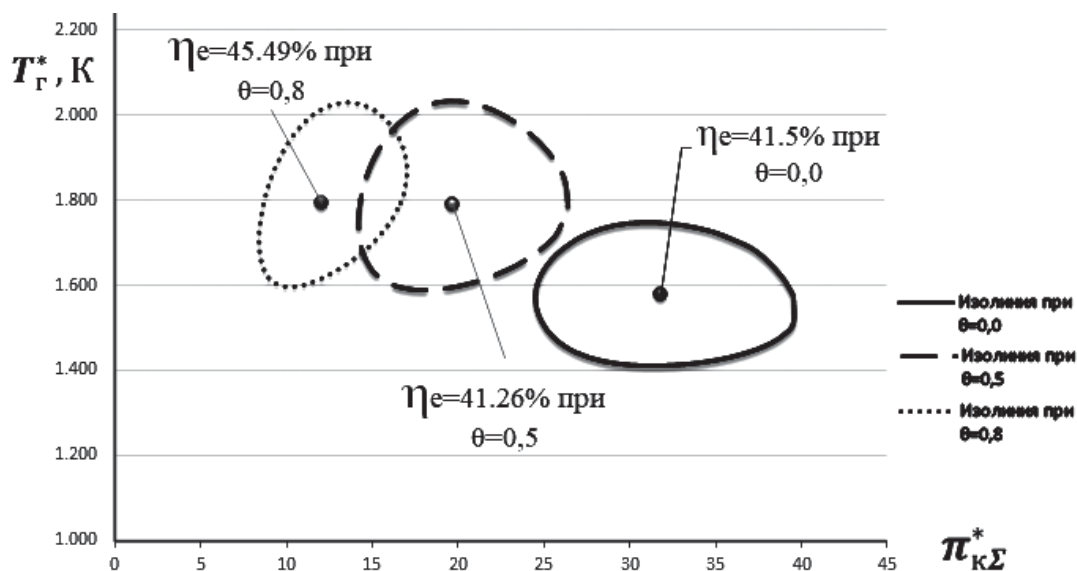


Рис. 7. Области оптимальных параметров по критерию эффективный КПД при различных значениях степени регенерации θ

Выводы

Утилизация тепла выхлопных газов позволяет увеличить эффективный КПД ГТУ на 5—10 %. Оптимизация параметров цикла позволяет получить наибольшие значения эффективного КПД.

Оптимальные значения степени повышения давления в термодинамическом цикле ГТУ с регенерацией тепла выхлопных газов существенно меньше (в 2—3 раза), чем у ГТУ без регенерации тепла. Чем больше степень регенерации тепла, тем меньше оптимальная по эффективному КПД степень повышения давления.

Оптимальные значения температуры газа перед турбиной в ГТУ с регенерацией тепла выхлопных газов выше, чем в ГТУ без регенерации, на 10—15 %, причем чем выше степень регенерации, тем выше оптимальные значения температуры газа перед турбиной.

За счет регенерации тепла выхлопных газов можно достигать высоких значений эффективного КПД (40—48%) с низкой степенью повышении давления ($\pi_{к\sigma}^* < 15$) при температуре газа $T_{г}^* = 1400 \dots 1700$ К. Такие значения эффективного

большой тяги, где трудно реализовать высокие $\pi_{к\sigma}^*$, или на режимах глубокого дросселирования.

Очевидно, что расход топлива можно снизить за счет использования регенератора, в котором горячий выхлопной газ турбины подогревает воздух между компрессором и камерой сгорания.

Библиографический список

1. Агульник А.Б., Гусаров С.А., Омар Х.Х. Выбор основных параметров циклов газопаротурбинной установки для газоперекачивающего агрегата // Труды МАИ. 2017. № 2. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77084>
2. Щуровский В.А., Зайцев Ю.А. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. — М.: Недра, 1994. — 191 с.
3. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. — М.: Нефть и газ, 1999. — 463 с.
4. Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е. и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 640 с.
5. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергети-

- ческих установок: учебник в 2 кн. Книга 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. — 4-е изд., испр. — М.: Инновационное машиностроение, 2017. — 332 с.
6. Кулагин В.В., Бочкарев С.К., Горюнов И.М. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Книга 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД. — М.: Машиностроение, 2005.— 464 с.
 7. Емин О.Н. Использование авиационных ГТД для создания наземных транспортных и стационарных энергетических установок: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 1998. — 80 с.
 8. Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ системе «АСТРА» // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41518>
 9. Ратников С.П. Применение вихревой трубы для повышения эффективности работы ГТУ // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 3. С. 63-68.
 10. Бакланов А.В. Малоэмиссионная камера сгорания диффузионного типа с микропламенным горением для конвертированного авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 57-68.
 11. Окорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Оптимальный модульный типоразмерный ряд энергоустановок с алюминием в качестве энергоносителя // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 73-79.
 12. Rahman M.M., Ibrahim T.K., Kadrigama K., Mamat R., Bakar R.A. Influence of Operation Conditions and Ambient Temperature on Performance of Gas Turbine Power Plant // Advanced Materials Research. 2011. Vols. 189-193, pp. 3007-3013. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3007
 13. Naradasu R.K., Konijeti R.K., Alluru V.R. Thermodynamic analysis of heat recovery steam generator in combined cycle power plant // Thermal Science. 2007. Vol. 11. No. 4, pp. 143-156. DOI: 10.2298/TSCI0704143R
 14. Ibrahim T.K., Rahman M.M. Thermal Impact of Operating Conditions on the Performance of a Combined Cycle Gas Turbine // Journal of Applied Research and Technology. 2012. Vol. 10. No. 4, pp. 567-577.
 15. Kaviri A.G., Jaafar M.N.M., Lazim T.M. Modeling and multi-objective exergy based optimization of a combined cycle power plant using a genetic algorithm // Energy Conversion and Management. 2012. Vol. 58, pp. 94-103. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.002
 16. Khaliq A., Kaushik S.C. Thermodynamic performance evaluation of combustion gas turbine cogeneration system with reheat // Applied Thermal Engineering. 2004. Vol. 24. No. 13, pp. 1785-1795. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.013
 17. Mitre J.F., Lacerda A.I., Lacerda R.F. Modeling and simulation of thermoelectric plant of combined cycles and its environmental impact // Thermal Engineering. 2005. Vol. 4. No. 1, pp. 83-88. DOI: 10.5380/ret.v4i1.3554
 18. Kurzke J., Halliwell I. Propulsion and Power: An Exploration of Gas Turbine Performance Modeling. — Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2018. — 755 p. ISBN: 978-3-319-75977-7
 19. Meherwan P. Boyce. Gas Turbine Engineering Handbook — 4th Edition — Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012. — 956 p. ISBN: 978-0-12-383842-1
 20. Kakac S.A., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. — 3rd edition — New York: CRC Press, 2012. — 631 p.
 21. Kuppam T. Heat Exchanger Design Handbook. — New York: Marcel Dekker Inc., 2000. — 1119 p. DOI: 10.1080/07373930008917833

EFFECTIVENESS IMPROVING TECHNIQUE FOR GAS TURBINE ENGINES OF GROUND APPLICATION BY HEAT REGENERATION

Kuz'michev V.S. *, Omar H.H. **, Tkachenko A.Yu.***

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
34, Moscovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

* e-mail: kuzm@ssau.ru

** e-mail: dr.hewa.omar@gmail.com

*** e-mail: tau@ssau.ru

Abstract

The requirements for the ground based gas turbine installations efficiency improvement are constantly increasing.

Heat conversion into work in gas turbine engines, operating by the Brayton cycle, is attended by significant losses, which depend on the cycle parameters and reach

up to 60–70% or more. At present, high-tech aircraft engines and their modifications are widely used as ground-based gas turbine plants, making provision for the gas turbines efficiency improvement based on the of combined thermodynamic cycles application.

The article considers the schemes of gas turbine units (GTU) for ground application with combined cycles, allowing improve their efficiency. One of the ways for the gas turbine units cycle improving is heat regeneration of the exhaust gases by installing a heat exchanger at the turbine outlet where a part of the heat is transferred into the air behind the compressor. However, relative bulkiness and substantial weight of the heat exchanger (even of plate type) do not allow at present active application of this scheme in aviation, but it is widely employed in ground applications.

In the case of ground based gas turbine unit, heat exchangers are located in the exhaust chamber or tower behind a power turbine. Thermal ratio of the most widely used tubular heat exchangers is $\theta = 0.8-0.9$, and plate-type heat exchangers are characterized by the thermal ratio of $\theta = 0.5-0.8$.

It is obvious that the main parameters of the thermodynamic cycle of gas turbines unite, such as the gas temperature T_g^* and the compressor pressure ratio ($\pi_{k\Sigma}^*$), as well as the parameters determining the working process of additional units (heat regenerators, steam turbine, etc.) of the combined installation play an important role in its efficiency improving. Comprehensive optimization of these cycle parameters is the main goal of the gas-turbine combined unit thermodynamic design.

Computer models of a gas turbine unit with combined thermodynamic cycles developed in the ASTRA SAE-system allowed solve the problems of nonlinear multi-criteria optimization of their operating parameters, determine the most rational schemes depending on the intended purpose and operating conditions of the gas turbine unit.

Russian Turbofan engine TRDDF RD-33 was selected as the basis for studying the heat regeneration impact on efficiency effectiveness. Its low pressure compressor was cut off to eliminate the bypass duct while converting it into ground based installation.

The following variation values of the cycle basic thermodynamic parameters were selected ($\pi_{k\Sigma}^* = 15, 30, 45, 60$ и $T_g^* = 1200, 1500, 1800, 2100$ K). The GTE module without exhaust gases heat regeneration and a GTE with exhaust gases heat regeneration were

developed employing ASTRA computer program. The paper presents some results of the study on GTE efficiency improvement.

Keywords: gas turbine installation, heat regeneration, work process parameters, scheme, effective efficiency, thermodynamic cycle, optimization.

References

1. Agul'nik A.B., Gusarov S.A., Omar H.H. *Trudy MAI*, 2017, no. 2. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77084>
2. Shchurovskii V.A., Zaitsev Yu.A. *Gazoturbinnye gazoperekachivayushchie agregaty* (Gas-turbine gas compressor units), Moscow, Nedra, 1994, 191 p.
3. Kozachenko A.N. *Ekspluatatsiya kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov* (Compressor stations operation of gas-main pipelines), Moscow, Neft' i gaz, 1999, 463 p.
4. Eliseev Yu.S., Manushin E.A., Mikhal'tsev V.E. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinnyykh i kombinirovannykh ustanovok* (Theory and design of gas turbine and combined plants), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2000, 640 p.
5. Kulagin V.V., Kuz'michev V.S. *Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok: uchebnik v 2 kn. Kniga 1. Osnovy teorii GTD. Rabochii protsess i termogazodinamicheskii analiz* (Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants. Book 1. Fundamentals of the theory of GTD. Workflow and thermodynamic analysis), Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 332 p.
6. Kulagin V.V., Bochkarev S.K., Goryunov I.M., Kuz'michev V.S. *Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok: uchebnik. Kniga 3. Osnovnye problemy: Nachal'nyi uroven' proektirovaniya, gazodinamicheskaya dovodka, spetsial'nye kharakteristiki i konversiya aviatsionnykh GTD* (Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants. Book 3. Main problems: Initial level of design, gas-dynamic refinement, special characteristics and aircraft GTE conversion), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 464 p.
7. Emin O.N. *Ispol'zovanie aviatsionnykh GTD dlya sozdaniya nazemnykh transportnykh i stantsionnykh energeticheskikh ustanovok* (Aircraft gas turbine engines application for ground transport and stationary power plants development), Moscow, MAI, 1998, 80 p.
8. Kuz'michev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Tkachenko A.Yu., Rybakov V.N. *Trudy MAI*, 2013, no. 67. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41518>
9. Ratnikov S.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 63-68.
10. Baklanov A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 57-68.
11. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 73-79.

12. Rahman M.M., Ibrahim T.K., Kadirgama K., Mamat R., Bakar R.A. Influence of Operation Conditions and Ambient Temperature on Performance of Gas Turbine Power Plant. *Advanced Materials Research*, 2011, vols. 189-193, pp. 3007-3013. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3007
13. Naradasu R.K., Konijeti R.K., Alluru V.R. Thermodynamic analysis of heat recovery steam generator in combined cycle power plant. *Thermal Science*, 2007, vol. 11, no. 4, pp. 143-156, DOI: 10.2298/TSCI0704143R
14. Ibrahim T.K., Rahman M.M. Thermal Impact of Operating Conditions on the Performance of a Combined Cycle Gas Turbine. *Journal of Applied Research and Technology*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 567-577.
15. Kaviri A.G., Jaafar M.N.M., Lazim T.M. Modeling and multi-objective exergy based optimization of a combined cycle power plant using a genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 58, pp. 94–103. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.002
16. Khaliq A., Kaushik S.C. Thermodynamic performance evaluation of combustion gas turbine cogeneration system with reheat. *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24, no. 13, pp. 1785–1795. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.013
17. Mitre J.F., Lacerda A.I., Lacerda R.F. Modeling and simulation of thermoelectric plant of combined cycles and its environmental impact. *Thermal Engineering*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 83–88. DOI: 10.5380/ret.v4i1.3554
18. Kurzke J., Halliwell I. *Propulsion and Power: An Exploration of Gas Turbine Performance Modeling*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2018, 755 p. ISBN: 978-3-319-75977-7
19. Meherwan P. Boyce. *Gas Turbine Engineering Handbook*, 4th Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012, 956 p. ISBN: 978-0-12-383842-1
20. Kakac S.A., Liu H., Pramuanjaroenkij A. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, 3rd edition, New York, CRC Press, 2012, 631 p.
21. Kuppan T. *Heat Exchanger Design Handbook*. New York, Marcel Dekker Inc., 2000, 1119 p. DOI: 10.1080/07373930008917833