

УДК 621.438

В.Т. МАТВЕЕНКО, В.А. ОЧЕРЕТЯНЫЙ, Г.В. ГОРОБЕЦ

Севастопольский национальный технический университет, Украина

ФОРСИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ СЛОЖНОГО ЦИКЛА С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ

Представлены результаты исследований ГТД сложных циклов с регенерацией теплоты с целью увеличения удельной мощности двигателя. Установлено, что усложнение цикла ГТД с регенерацией теплоты введением промежуточного охлаждения между каскадами компрессоров или применением турбины перерасширения увеличивает как удельную мощность, так и эффективный КПД двигателей. Дальнейшее существенное увеличение мощности двигателей обеспечивается за счет промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной, особенно в цикле ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты, где в процессе форсирования сохраняется эффективный КПД на прежнем высоком уровне.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, регенерация теплоты, промежуточное охлаждение воздуха, промежуточный подогрев газа, турбина перерасширения.

Введение

Повышение энергоэффективности промышленных ГТД, применяемых как когенерационные для выработки электрической и тепловой энергии, и как приводных в газоперекачивающих агрегатах и в составе пропульсивных комплексов судов, возможно за счет усложнения термодинамического цикла двигателя.

Для газотранспортных систем в качестве перспективного предлагается ГТД с регенерацией теплоты [1, 2], который имеет ряд положительных качеств, полученных за счет внутрициклового утилизации теплоты выхлопных газов в подогревателе воздуха (регенераторе).

Применение в тепловой схеме ГТД регенератора, масса которого на порядок больше массы остальных элементов двигателя, существенно увеличивает удельные массовые характеристики двигателя, кроме того, удельная мощность рабочего тела в цикле ГТД с регенерацией теплоты несколько меньше, чем в ГТД простого цикла.

Поэтому улучшение удельных энергетических и массовых характеристик газотурбинных двигателей с регенерацией теплоты является задачей актуальной.

Целью исследований, представленных в статье, является определение эффективности способов повышения удельных характеристик ГТД с регенерацией теплоты, применяемых в морском транспорте, в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов и средств освоения шельфа.

1. Направления первого этапа улучшения удельных характеристик ГТД с регенерацией теплоты

В качестве базового двигателя рассматривается ГТД с регенерацией теплоты конструктивно выполненный со свободной силовой турбиной, что характерно для всережимных приводных двигателей. Традиционно увеличение КПД и удельной мощности производят посредством применения промежуточного охлаждения (ПО) воздуха между каскадами компрессоров ГТД с регенерацией теплоты (рис. 1).

ГТД с ПО и Р теплоты WR21 создан для корабля фирмой Rolls-Royce, который обладает мощностью в 25,2 МВт, КПД $\eta_e=42,4\%$ при степени повышения давления в компрессорах $\pi_k=16,2$, расходе газа $G_r=73,2$ кг/с, температуре на выходе из турбины – 851 °С [3].

Примером применения промежуточного охлаждения воздуха между частями однокаскадного компрессора может служить ГТУ «Надежда» Невского завода (г. Санкт-Петербург) (рис. 2) мощностью 16,5 МВт, $\eta_e=43\%$ при $\pi_k=9,84$, $G_r=60,8$ кг/с и температуре газа за силовой турбиной 822 °С [4].

Усложнение цикла ГТД с регенерацией теплоты возможно произвести нетрадиционным способом посредством перерасширения газа на выходе из силовой турбины (рис. 3), что позволяет получить за вычетом энергии на дожимание газа дополнительную работу, которая повысит КПД и удельную мощность двигателя [5].

Конструктивно эта схема реализуется встраиванием регенератора в турбокомпрессорный утили-

затор (ТКУ), образованный турбиной перерасширения (ТП), дожимающим компрессором (ДК) и регенератором с охладителем газа (котлом-утилизатором) между ними.

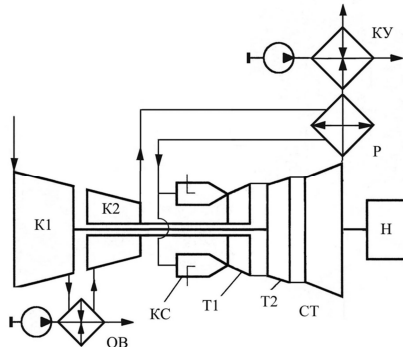


Рис. 1. Схема ГТД с ПО и регенерацией теплоты

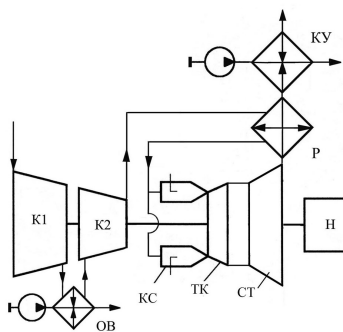


Рис. 2. Схема ГТД с ПО между частями компрессора и регенерацией теплоты

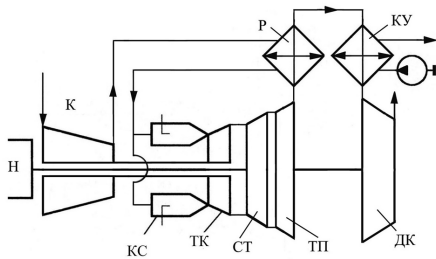


Рис. 3. Схема ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты

Возможность создания ГТД с ТКУ и регенерацией теплоты обоснована в техническом предложении, разработанном ранее НПП «Машпроект» (г. Николаев) совместно с СевНТУ. ГТД с ТКУ и Р для газоперекачивающего агрегата имеет следующие характеристики: мощность 10 МВт, эффективный КПД – 43,2%; тепловая мощность – 9,1 МВт; теплотехнический (общий) КПД – 80,3% при $\pi_k = 5,0$; в ДК $\pi_{dk} = 2,2$ и степени регенерации $\sigma = 0,8$.

2. Результаты исследования усложнения цикла ГТД с регенерацией теплоты

Для определения характеристик ГТД применена универсальная термодинамическая модель цикла ГТД с регенерацией теплоты [6] и ее вариант, до-

полненный введением промощаждения между каскадами компрессоров газогенератора двигателя. Исследования параметров циклов проводились при изменении величины степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, начальной температуры газа T_3 , а также при различных степенях регенерации σ и давления в дожимающем компрессоре π_{dk} . Здесь и далее приняты условные обозначения: π – степень повышения давления в компрессоре или расширения в турбине; η – КПД турбомашин; T – температура; n – удельная мощность одного кг рабочего тела. Индексы: к – компрессор; dk – дожимающий компрессор; тп – турбина перерасширения; е – эффективный.

На рис. 4 показаны зависимости эффективного КПД (η_e) и удельной мощности ($n_{уд}$) сложных циклов ГТД с регенерацией теплоты от изменения π_k при начальной температуре газа $T_3 = 1473$ К и степени регенерации $\sigma = 0,85$. Обозначения на рис. 4: Р – цикл ГТД с регенерацией; Р+ПО – цикл ГТД с промощаждением между компрессорами и регенерацией теплоты; Р+ТП – цикл ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты. Для сравнения приводят параметры ГТД простого цикла (кривая П).

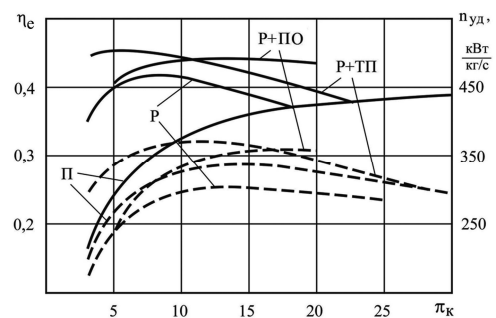


Рис. 4. Зависимости эффективного КПД η_e (сплошные линии), и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от π_k при $T_3 = 1473$ К, $\sigma = 0,85$ и $\pi_{dk} = 2,0$

Анализ результатов исследования показал – увеличение КПД (η_e) для цикла ГТД с регенерацией теплоты по отношению к КПД простого цикла составляет (относительно) 10...12,5%, а удельная мощность в цикле ГТД и Р во всем диапазоне изменения π_k меньше, чем в простом цикле и находится вне оптимальной зоны.

Введение промощаждения в ГТД с Р обеспечивает дальнейший рост КПД двигателя, удельная мощность выходит на уровень ГТД простого цикла, оптимальная степень повышения давления в двигателе находится в диапазоне от 10 до 16, что позволяет их создавать на базе ГТД простого цикла с двухкаскадным компрессором.

Из представленных зависимостей параметров на рис. 4 видно, что увеличение КПД цикла ГТД с

ТП и Р составляет до 20 % относительных по отношению к простому циклу, а значения удельной мощности превышают величины ГТД с Р на 30...40 %.

Применение в ГТД с Р промежуточного охлаждения или турбины перерасширения могут рассматриваться как примерно равные способы повышения КПД двигателей, однако, в ГТД с ТП и Р более существенно растет удельная мощность двигателя, что положительно отражается на массо-габаритных характеристиках теплообменного оборудования.

3. Эффективность применения промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной в ГТД сложного цикла

Дальнейшее увеличение удельной мощности в сложном цикле ГТД с регенерацией теплоты можно осуществить путем применения промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной. Конструктивно это выполняется встраиванием камеры промподогрева газа в разъем между турбиной турбокомпрессора и силовой турбиной. На рис. 1, 2 и 3 эти турбины механически не связаны между собой.

Температура газа перед силовой турбиной (СТ) равна $T_{4.3} = k_n \cdot T_3$, где k_n – коэффициент, определяющий степень подогрева газа перед СТ; T_3 – начальная температура газа за основной камерой сгорания (КС).

Результаты исследования влияния степени подогрева газа перед силовой турбиной на характеристики ГТД сложных циклов приведены на рис. 4 и 5.

Обозначения для цикла ГТД с промхлаждением (ПО), промподогревом (ПП) и регенерацией теплоты (Р) принято Р/ПП+ПО, для цикла ГТД с ПО между компрессором, ПП и Р – Р/ПП+ПО/2 и для цикла ГТД с ПП, ТП и Р – Р/ПП+ТП.

Из представленных зависимостей на рис. 5 и 6 видно, что относительное увеличение удельной мощности с промподогревом газа перед СТ происходит во всех рассматриваемых сложных циклах. По величине и интенсивности увеличения удельной мощности преобладает цикл Р/ПП+ТП, менее интенсивный цикл – Р/ПП+ПО/2.

В циклах Р/ПП+ТП и Р/ПП+ПО при промподогреве газа до температуры T_3 удельная мощность увеличивается в 1,3...1,4 раза, однако, в цикле Р/ПП+ПО уменьшается КПД η_e , а в цикле Р/ПП+ПО/2 еще в большей степени.

В цикле Р/ПП+ТП при промподогреве интенсивно растет удельная мощность, при этом КПД η_e остается стабильно высоким за счет турбины перерасширения.

Ранее в работе [7] было показано, что промподогрев в цикле Р/ПП+ТП увеличивает удельную

мощность в 1,5 раза по сравнению с циклом Р/ПП (ГТД с ПП и Р), а также с ГТД простого цикла.

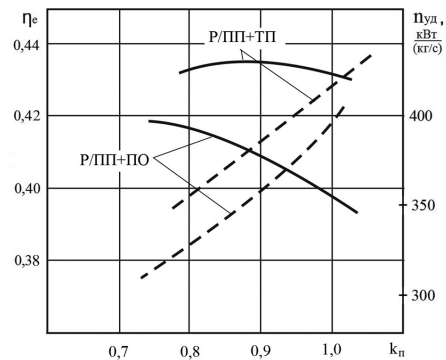


Рис. 5. Зависимости КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от k_n при $T_3 = 1473 \text{ К}$, $\sigma = 0,8$:
 – в Р/ПП+ТП – $\pi_k = 7$, $\pi_{лк} = 2,25$;
 – в Р/ПП+ПО – $\pi_k = 12$, $T_{2.1} = 323 \text{ К}$

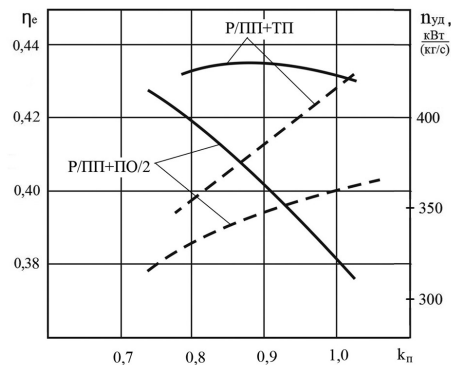


Рис. 6. Зависимости КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от k_n при $T_3 = 1473 \text{ К}$, $\sigma = 0,8$:
 – в Р/ПП+ТП – $\pi_k = 7$, $\pi_{лк} = 2,25$;
 – в Р/ПП+ПО/2 – $\pi_k = 12$, $T_{2.1} = 323 \text{ К}$

Дальнейшие исследования ГТД сложных циклов с промежуточным подогревом газа целесообразно провести в направлении определения характеристик установок на переменных режимах работы.

Заключение

1. Введение в цикл ГТД с регенерацией теплоты промежуточного охлаждения воздуха между каскадами компрессора двигателя или применение турбины перерасширения дает увеличение эффективно-го КПД и удельной мощности двигателя.

2. Промежуточный подогрев газа перед силовой турбиной в схемах ГТД с промхлаждением и регенерацией теплоты обеспечивает форсирование двигателей по мощности, но эффективный КПД при этом несколько снижается.

3. Промежуточный подогрев газа перед силовой турбиной в схемах ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты обеспечивает увели-

чение мощности в 1,5 раза по сравнению с ГТД простого цикла, при этом эффективный КПД остается на прежнем высоком уровне.

Литература

1. Халатов, А.А. Какие газотурбинные двигатели необходимы газотранспортной системе Украины [Текст] / А.А. Халатов, Д.А. Костенко // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 7. – С. 22-24.

2. Романов, В. Газотурбинный двигатель для газовой промышленности [Текст] / В. Романов, О. Кучеренко // Нефть и газ. – 2008. – № 6. – С. 22-26.

3. Colin, R. The WR-21 Intercooled Recuperated Gas Turbine Engine – Integration Into Future Warships [Text] / R. Colin // Proceedings of the Gas Turbine Congress 2003 Tokyo, November 2-7, 2003, IGTC 2003 Tokyo OS-203.

4. Газотурбинный агрегат «Надежда» [Текст] / Г. Богорадовский и др. // Газотурбинные технологии. – 2001. – № 1(10). – С. 17-19.

5. Приводные ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты [Текст] / В.Т. Матвеевко, В.П. Трошин, А.А. Филоненко, О.С. Кучеренко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 6(41). – С. 42-44.

6. Матвеевко, В.Т. Теплотехнические характеристики ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты [Текст] / В.Т. Матвеевко // Зб. наук. праць УДМУ. – № 5(365). – Миколаїв, 1999. – С. 54-59.

7. Матвеевко, В.Т. Перспективы повышения эффективности ГТД с регенерацией теплоты усложнением цикла [Текст] / В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяний, А.Г. Андриец // Вестник СевНТУ. – 2010. – № 106. – С. 120-123.

Поступила в редакцию 23.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.Н. Салов, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.

ФОРСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА СКЛАДНОГО ЦИКЛУ З РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ

В.Т. Матвієнко, В.А. Очеретяний, Г.В. Горобець

Представлені результати досліджень ВМД складних циклів з регенерацією теплоти з метою збільшення питомої потужності двигуна. Встановлено, що ускладнення циклу ВМД з регенерацією теплоти введенням проміжного охолодження між каскадами компресорів або застосування турбіни перерозширення збільшує як питому потужність, так і ефективний ККД двигунів. даль-дальшої істотно збільшення потужності двигунів забезпечується за рахунок проміжного підігріву газу перед силовою турбіною, особливо в циклі ГТД з турбіною перерозширення і регенерацією теплоти, де в процесі формування зберігається ефективний ККД на колишньому високому рівні.

Ключові слова: газотурбінний двигун, регенерація теплоти, проміжне охолодження повітря, що проміжний підігрів газу, турбіна перерозширення.

POWER BOOST GAS TURBINE ENGINES COMPLETE CYCLES, HEAT RECOVERY

V.T. Matvienko, V.A. Ocheretianij, G.V. Gorobets

The results of studies of complex turbine engine cycles with heat recovery to increase in the specific power of the engine. Found that the complexity of the cycle turbine engine with regeneration heat of the introduction of the intermediate cooling between stages of compressors or turbine apply overexpansion increases both the power density and the effective efficiency of the engines. further significant increase in engine power is provided by an intermediate reheating the gas in front of the power turbine, especially in the cycle turbine engine turbine with heat recovery overexpansion and where in the process of effective efficiency remains at the same high level.

Keywords: gas turbine, heat recovery, intermediate cooling of the air, the intermediate heating gas turbine overexpansion.

Матвеевко Валерий Тимофеевич – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры энергоустановок морских судов и сооружений Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: mvt39@ukr.net, root@sevgtu.sebastopol.ua.

Очеретяний Владимир Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергоустановок морских судов и сооружений Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: ocheret-1961@rambler.ru, root@sevgtu.sebastopol.ua.

Горобец Галина Владимировна – старший преподаватель кафедры энергоустановок морских судов и сооружений Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua.