

УДК 621.438

В.Т. МАТВЕЕНКО, В.А. ОЧЕРЕТЯНЫЙ

Севастопольский национальный технический университет, Украина

ФОРСИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ГТУ С УТИЛИЗИРУЮЩИМИ ТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Представлены результаты исследований и разработок комбинированных газотурбинных установок (КГТУ). В работе рассмотрены конструктивные схемы формирования КГТУ сложного цикла. КГТУ включают форсирование мощности за счет введения промежуточного перегрева (ПП) перед силовой турбиной. Выполнен сравнительный анализ КГТУ с ПП, состоящего из основного ГТД и утилизирующей воздушной турбины (ВТ) и КГТУ, содержащего основной ГТД и турбину перерасширения (ТП). Показано, что на различных режимах работы эффективный КПД КГТУ с ПП с ВТ выше, чем в ГТД простого цикла. Форсирование КГТУ с утилизирующей ВТ за счет умеренного ПП позволяет повысить мощность установки более чем в 1,3 раза.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, комбинированная газотурбинная установка, воздушная утилизирующая турбина, когенерация.

Введение

Одним из направлений повышения энергоэффективности ГТД является создание комбинированных ГТУ, где дополнительный двигатель, работающий по газотурбинному циклу, использует энергию выхлопных газов основного ГТД.

При этом возможны два варианта передачи теплоты выхлопных газов основного ГТД (ГТД_{осн.}) в дополнительный ГТД (ГТД_{доп.}) [1]:

- подогревом сжатого воздуха в теплообменнике перед воздушной турбиной ГТД_{доп.};
- отработавшие газы ГТД_{осн.} используются в ГТД с турбиной перерасширения (ТП).

В комбинированной ГТУ, где ГТД_{осн.} работает совместно с ГТД_{доп.}, работающим по простому циклу на воздухе или циклу с турбиной перерасширения на газе, эффективный КПД и удельная мощность относительно на 15-20 % выше, чем в ГТД простого цикла [1, 2, 3], и достигает КПД значений более 40 %.

Комбинированная ГТУ с утилизирующими турбинными двигателями (УТД) по отношению к ГТД простого цикла имеет в своем составе дополнительно элементы турбомашин и теплообменники, которые в целом утяжеляют установку, поэтому желательно увеличить мощность установки при сохранении ее массы.

Введение в основную схему ГТД_{осн.} промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной увеличит мощность как ГТД_{осн.}, так и ГТД_{доп.}, что в целом повысит удельную мощность комбинированной ГТУ.

В работе [1] рассматривались комбинированные ГТД с УТД, где ГТД_{осн.} имеет свободную силовую турбину, что позволяет встраивать камеру сгорания между газогенератором двигателя и силовой турбиной, не нарушая конструкцию газогенератора, который является базовым элементом ГТД.

На рис. 1 приведена схема комбинированной ГТУ (КГТУ), которая состоит из основного ГТД с камерой сгорания промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной и дополнительного (ГТД_{доп.}).

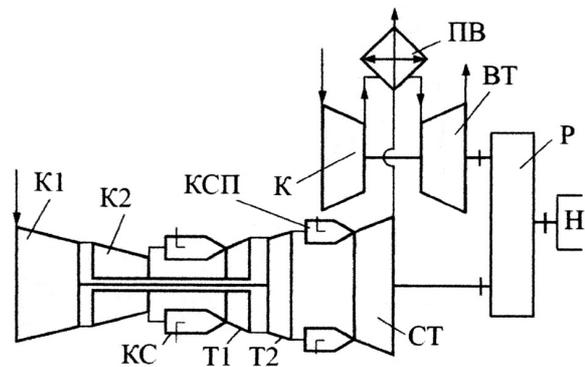


Рис. 1. Схема КГТУ с ПП газа в ГТД_{осн.} и ГТД_{доп.} с ВТ: K1 и K2 – компрессоры; КС – камера сгорания; КСП – КС промподогрева; T1 и T2 – турбины K1 и K2; СТ – силовая турбина; ПВ – подогреватель воздуха; ВТ – воздушная турбина; Р – редуктор; Н – нагрузка

В ГТД_{доп.} сжатый после компрессора (K) воздух нагревается в подогревателе воздуха (ПВ) за счет теплоты отработавших газов ГТД_{осн.}. ГТД_{осн.} через

редуктор связан с воздушной турбиной, что обеспечивает совместную работу на общую нагрузку.

В координатах T-S (рис. 2) представлен цикл высокотемпературного ГТД с ПП газа, где реальные процессы расширения газа в турбинах, охлаждаемых цикловом воздухом, представлены эквивалентными процессами: 3см-4.1 – в турбине Т1; 4.1см-4.2 – в турбине Т2; 4.3см-4 – в силовой турбине. 1-2д-3д-4д – рабочий цикл в ГТД_{доп.}. Начальная температура $T_{3д}$ в цикле ГТД_{доп.} меньше температуры T_4 на выхлопе ГТД_{осн.} на величину температурного напора в подогревателе воздуха.

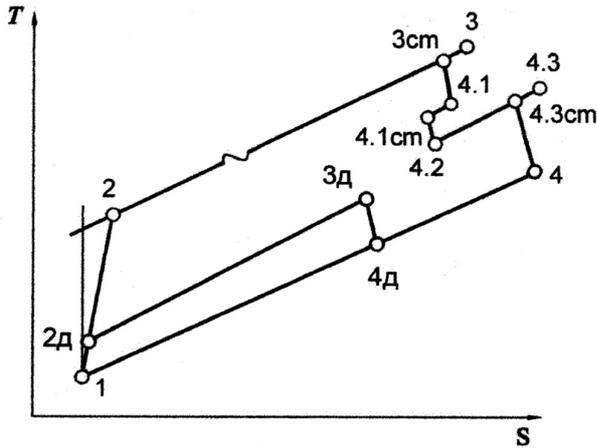


Рис. 2. Цикл ГТД_{осн.} с промподогревом газа и ГТД_{доп.} с ВТ

На рис. 3 комбинированная ГТУ в своем составе имеет ГТД_{осн.} и ГТД_{доп.}, в котором применена

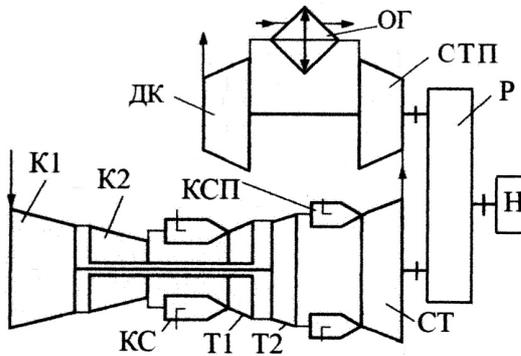


Рис. 3. Схема КГТД с ГТД_{доп.} с силовой турбиной перерасширения:

К1 и К2 – компрессоры; КС – камера сгорания; КСП – КС промподогрева; Т1 и Т2 – турбины К1 и К2; СТ – силовая турбина; ОГ – охладитель газа; ДК – дожимающий компрессор; СТП – силовая турбина перерасширения; Р – редуктор; Н – нагрузка

турбина перерасширения, работающая на выхлопных газах основного ГТД. В силовой ТП газ расширяется до давления меньше атмосферного (примерно 0,5 атм), охлаждается в охладителе газа (ОГ) и

дожимающим компрессором выбрасывается в атмосферу.

Начальная температура газа перед СТП равна температуре выхлопного газа ГТД_{осн.}. Дополнительная мощность в КГТУ образуется за счет мощности СТП за вычетом мощности на дожимание газа в ДК.

В координатах T-S (рис. 4) представлен цикл высокотемпературного ГТД с ПП газа, к выхлопу которого присоединен ГТД_{доп.} с СТП. Газ с давлением меньше атмосферного охлаждается в процессе 5-6 и далее сжимается в процессе 6-7 в ДК и выбрасывается в атмосферу.

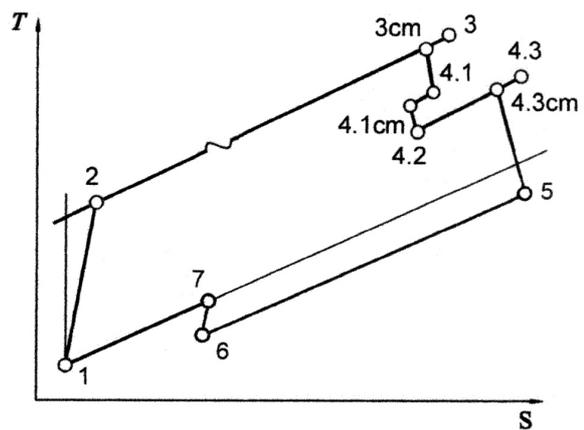


Рис. 4. Цикл КГТУ с промподогревом газа и силовой турбиной перерасширения

1. Методика определения характеристик КГТУ

Определение параметров циклов высокотемпературных ГТД_{осн.} введением промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной, а также применением турбины перерасширения, выполнено с использованием апробированной математической модели [4].

В ГТД_{осн.} с ПП газа используется параметр – это степень подогрева газа перед СТ, от которой существенно зависят ряд технических характеристик ГТД [5].

Температура газа перед СТ равна

$$T_{4.3} = k_n \cdot T_3, \tag{1}$$

где k_n – коэффициент, определяющий степень подогрева газа перед СТ;

T_3 – начальная температура газа в двигателе.

Определение параметров цикла ГТД_{доп.} с воздушной турбиной было детально проведено в работе [2]. Оптимальная степень повышения давления в компрессоре ГТД_{доп.}, с учетом промподогрева газа в ГТД_{осн.}, находится в пределах от 3,0 до 4,0.

В КГТУ анализ экономичности и других параметров установки производится при изменении ве-

личины степени повышения давления π_k в ГТД_{осн.}, начальной температуре газа T_3 и прочих фиксированных параметрах, влияющих на КПД цикла.

2. Результаты определения характеристик КГТУ

На рис. 5 представлены характеристики КГТУ, в состав которой входит ГТД_{осн.} с ПП перед СТ и ГТД_{доп.} с воздушной турбиной (2С/ПП+ВТ), а также КГТУ с ГТД_{осн.} без ПП, но с ВТ (2С+ВТ), в зависимости от степени повышения давления π_k в компрессоре ГТД_{осн.} при начальной температуре газа $T_3=1473$ К.

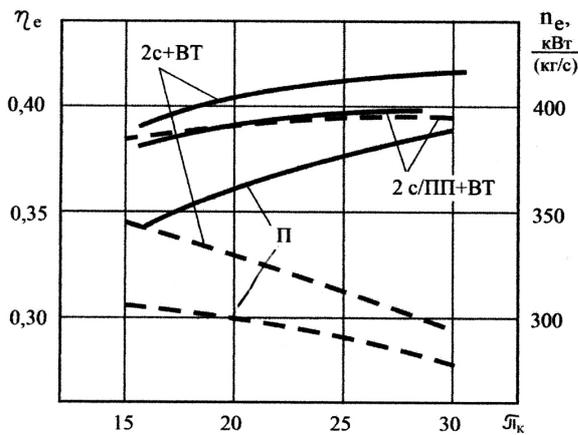


Рис. 5. Зависимость КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от π_k при $T_3=1473$ К, $k_n=0,8$, $\pi_{dk}=3,5$ и $\sigma_{пв}=0,85$:
П – ГТД простого цикла;
2С+ВТ – КГТУ с воздушной турбиной;
2С/ПП+ВТ – КГТУ с ПП в ГТД_{осн.} и ВТ

При определении значений эффективного КПД (η_e) установки и удельной мощности ($n_{уд}$) применялся коэффициент $k_n=0,8$, что обеспечивало умеренный подогрев газа перед СТ до температуры $T_{4,3}=1178$ К, что требует охлаждения только сопловых лопаток СТ. На рис. 5 также приведены для сравнения характеристики ГТД простого цикла.

Из приведенных на рис. 5 зависимостей видно, что введение ПП перед СТ в ГТД_{осн.} увеличивает удельную мощность КГТУ (2С/ПП+ВТ) в 1,33 раза по отношению к ГТД простого цикла с $\pi_k=22$, а КПД несколько ниже, чем в КГТУ без ПП, но при всех значениях π_k выше, чем КПД у ГТД простого цикла.

На рис. 6 представлены характеристики КГТУ, в состав которой входит ГТД_{осн.} с ПП газа перед СТ и ГТД_{доп.} с силовой ТП (П/ПП+ТП), а также КГТУ с ГТД_{осн.} без ПП, но с ГТД_{доп.} с силовой ТП (П+ТП), в зависимости от степени повышения давления π_k в

компрессоре ГТД_{осн.}. Для сравнения на рис. 6 приведены характеристики ГТД простого цикла.

Введение ПП в ГТД_{осн.} и применение СТП увеличивает удельную мощность КГТУ (П/ПП+ТП) в 1,36 раза по отношению к ГТД простого цикла. КПД КГТУ (П/ПП+ТП) на 10 % (относительно) выше, чем КПД в ГТД простого цикла, а КГТУ (П+ТП) имеет КПД на 14,2 % (относительно) выше, чем КПД ГТД простого цикла, при этом удельная мощность больше в 1,1 раза.

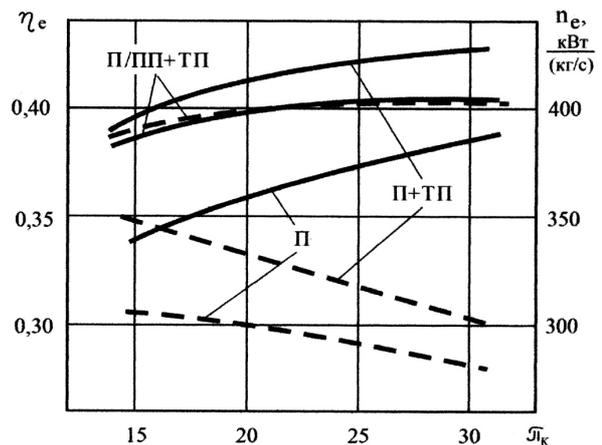


Рис. 6. Зависимость КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от π_k при $T_3=1473$ К, $k_n=0,8$, $\pi_{dk}=2,25$ и $\sigma_{пв}=0,85$:
П – ГТД простого цикла; П+ТП – ГТД с турбиной перерасширения; П/ПП+ТП – КГТУ с ПП и 2С+ВТ КГТУ с воздушной турбиной; 2С/ПП+ВТ – КГТУ с ПП в ГТД_{доп.} С ТП

Таким образом, введение ПП газа в КГТУ с УТД увеличивает удельную мощность установки при умеренном повышении температуры газа перед СТ ГТД_{осн.} в среднем в 1,3 раза, при коэффициенте $k_n=1,0$ мощность увеличивается более чем в 1,5 раза.

Выводы

1. Форсирование КГТУ с УТД за счет умеренного подогрева газа перед силовой турбиной позволяет повысить мощность установки более чем в 1,3 раза.
2. Дополнение схемы ГТД утилизационными турбинными двигателями повышает КПД установки в 1,1...1,15 раза.

Литература

1. Матвеевко, В.Т. Энергоэффективность комбинированной ГТУ с утилизирующими турбинными двигателями [Текст] / В.Т. Матвеевко,

В.А. Очеретяный // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, 2010. – № 7 (88). – С. 44-48.

2. Характеристики газотурбинных двигателей с воздушными турбинными теплоутилизирующими установками [Текст] / О.С. Кучеренко [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Х., 2010. – Вып. 3/3(45). – С. 26-31.

3. ГТУ-27ПС – перспективный газотурбинный привод сложного цикла / А.А. Иноземцев [и др.]

[Текст] // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, 2005. – № 4. – С. 2-7.

4. Матвеевко, В.Т. Математическая модель для определения параметров циклов газотурбинных двигателей с промежуточным подогревом газа перед силовой турбиной [Текст] / В.Т. Матвеевко // Вестник СевГТУ: Сб. научн. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2002. – Вып.38. – С. 110-114.

Поступила в редакцию 22.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.В. Капустин, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.

ФОРСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ КОМБІНОВАНИХ ГТУ З УТИЛІЗУЮЧИМИ ТУРБІННИМИ ДВИГУНАМИ

В.Т. Матвієнко, В.А. Очеретяний

Представлені результати досліджень і розробок комбінованих газотурбінних установок (КДТУ). В роботі розглянуті конструктивні схеми формування КДТУ складного циклу. КДТУ включають форсування потужності за рахунок введення проміжного перегріву (ПП) перед силовою турбіною. Виконано порівняльний аналіз КДТУ з ПП, що складається з основного ГТД та утилізуючої повітряної турбіни (ПТ) і КДТУ, що містить основний ГТД і турбіну перерозширення (ТП). Показано, що на різних режимах роботи ефективний ККД КДТУ з ПП з ВТ вище, ніж у ГТД простого циклу. Форсування КДТУ з утилізуючою ВТ за рахунок помірною ПП дозволяє підвищити потужність установки більш ніж в 1,3 рази.

Ключові слова: газотурбінний двигун, комбінована газотурбінна установка, повітряна утилізуюча турбіна, когенерація.

FORCING THE POWER OF COMBINED GAS TURBINE POWER PLANT WITH HEAT RECOVERY OF TURBINE ENGINE

V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyaniy

The results of research and development of of combined gas turbine power plant (CGTPP) are present. In this paper the design scheme of the formation of CGTPP of complex cycles are considered. CGTPP include the power to force through the introduction of reheat (RH) in front of power turbine. A comparative analysis of CGTPP with RH, which consist of a main GTE and utilizing air turbine (UAT) and CGTPP, containing the main GTE and turbine of overexpansion (TO) are made. It is show that different modes of the effective efficiency of CGTPP with TO and UAT higher than the GTE simple cycle. Forcing CGTPP with UAT through a moderate increase of RH can increase that plant capacity to more than 1,3 times.

Key words: gas turbine engine, combined gas turbine power plant, recycled air turbine, cogeneration.

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

Очеретяный 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.