

УДК 621.438

В.Т. Матвеев, профессор, д-р техн. наук,**В.А. Очеретяний, доцент, канд. техн. наук,****А.Г. Андриец, доцент, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ УСЛОЖНЕНИЕМ ЦИКЛА БРАЙТОНА**

Представлены результаты исследования по повышению эффективности цикла Брайтона посредством его усложнения за счет введения промохлаждения воздуха, промподогрева газа и применения турбины перерасширения. Показано, что традиционное усложнение цикла высокотемпературного ГТД дает только увеличение удельной мощности, а применение турбины перерасширения увеличивает также эффективный КПД.

Введение. Повышение эффективности ГТД простого цикла (без регенерации теплоты) осуществляется обычно за счет повышения начальной температуры газа, совершенствования аэродинамических характеристик элементов двигателя и выбора оптимальной степени повышения давления в компрессорах. С ростом начальных температур газа и увеличением отбора циклового воздуха на охлаждение элементов двигателя (сопловых и рабочих лопаток турбин и т.д.) данное направление постепенно исчерпывает свои возможности.

Следующим направлением повышения эффективности ГТД считается усложнение рабочего цикла двигателя за счет введения в тепловую схему промежуточного охлаждения (ПО) воздуха между каскадами компрессоров, промежуточного подогрева (ПП) газа между турбинами по отдельности или ПО и ПП вместе, а также нетрадиционного способа – применения турбины перерасширения.

Введение этих элементов в цикл позволяет конструкция ГТД корабельного типа, так как они, как правило, обычно выполняются с двухкаскадными компрессорами и отдельными турбинами.

Целью работы является исследование ГТД с ПО, ПП и турбиной перерасширения.

ГТД с промежуточным охлаждением воздуха в компрессоре. На рисунке 1 изображена схема ГТД с ПО воздуха между каскадами компрессоров К1 и К2, которые приводятся отдельными турбинами, входящими в состав газогенератора, силовая турбина выполнена свободной.

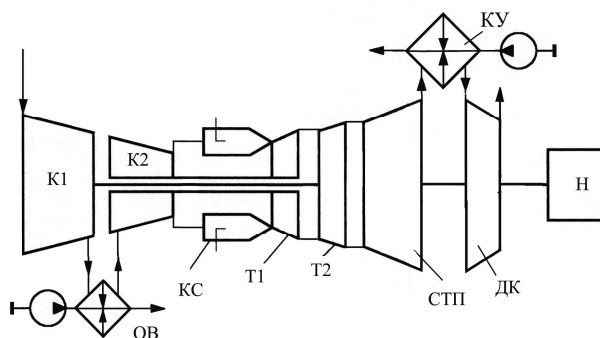


Рисунок 1 – Схема ГТД с промохлаждением воздуха и силовой турбиной перерасширения:

К1 и К2 – компрессоры; КС – камера сгорания;
Т1 и Т2 – турбины; СТП – силовая турбина перерасширения;
ДК – дожимающий компрессор; Н – нагрузка;
ОВ – охладитель воздуха; КУ – котел-утилизатор

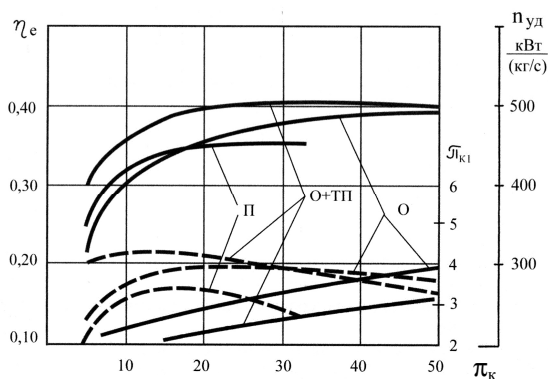


Рисунок 2 – Характеристики циклов ГТД с ПО воздуха и турбиной перерасширения:

$2СН/О+ТП; T_3 = 1373 \text{ К}, \pi_{ДК} = 2,25, \bar{G}_{В01} = 0,11,$

$2СН/О; T_3 = 1373 \text{ К}, \pi_{ДК} = 1, \bar{G}_{В01} = 0,11$

Исследование характеристик циклов проводилось при различных начальных температурах T_3 , степенях повышения давления в двигателях π_k и оптимальном соотношении давлений за компрессорами (π_{k1}/π_k), дающих максимальный эффективный КПД при заданных исходных данных.

В состав ГТД с ПО на рисунке 1 также входит силовая турбина перерасширения (СТП), для реализации работы которой применен дожимающий компрессор (ДК) и охладитель газа (котел-утилизатор) между ними. Степень повышения давления в ДК принята $\pi_{ДК} = 2,25$, как наиболее оптимальная.

Результаты исследования характеристик цикла ГТД с ПО, ГТД с ПО+ТП, а также для сравнения ГТД простого цикла (П) приведены на рисунке 2. В ГТД с ПО отмечается некоторый рост эффективного КПД η_e при больших значениях $\pi_k = 20 \dots 50$, что не противоречит классическим представлениям об этом цикле. Растет также удельная мощность $n_{уд}$ при $\pi_k = 15 \dots 25$ на 15...20 %, но при оптимальных π_k по η_e удельная мощность падает и незначительно превышает $n_{уд}$ для ГТД простого цикла.

Применение в ГТД ПО воздуха в сочетании с турбиной перерасширения дает существенный прирост эффективного КПД и по сравнению с ГТД простого цикла и ГТД с ПО в диапазоне $\pi_k = 15 \dots 25$. Удельная мощность $n_{уд}$ в ГТД с ПО+ТП практически такая же, как и в ГТД с ПО.

ГТД с промежуточным подогревом газа. На рисунке 3 изображена схема ГТД с ПП газа между турбинами T1 и T2 газогенератора, которая удобна конструктивно и теоретически рекомендуется для получения более высокого эффективного КПД. На рисунке 3 представлено также сочетание ПП газа в ГТД и турбины перерасширения. Подогрев газа во второй камере сгорания КСП при исследовании характеристик цикла производили до температуры $T_{3,2} = T_3$, то есть $k_{п} = T_{2,3}/T_3 = 1$. Выбиралось оптимальное соотношение давлений за компрессорами (π_{k1}/π_k), дающее максимальное значение эффективного КПД при заданных исходных данных.

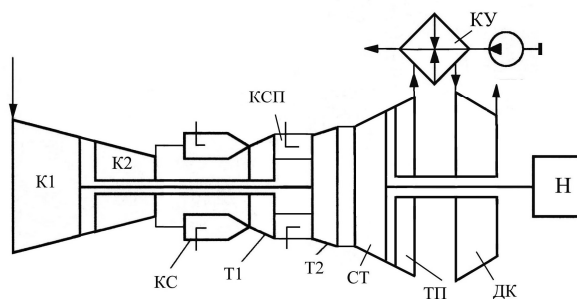


Рисунок 3 – Схема ГТД с промподогревом газа и турбиной перерасширения: K1 и K2 – компрессоры; KC – камера сгорания; КСП – КС промподогрева; T1 и T2 – турбины; CT – силовая турбина; ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; Н – нагрузка

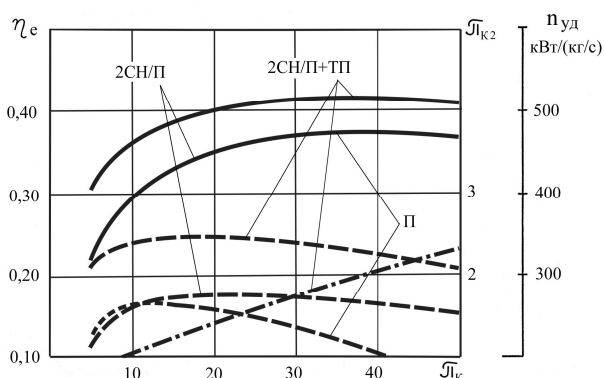


Рисунок 4 – Зависимости эффективного КПД η_e (сплошные линии), удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии), π_{k2} (штрих-пунктирная линия) от π_k при $T_3 = 1373$ К, $k_{п} = 1,0$ и $\pi_{dk} = 2,5$ и $1,0$ при максимальных значениях эффективного КПД (η_e), $\bar{G}_{во1} = 0,11$, $\bar{G}_{во2} = 0,09$

Результаты исследования характеристик цикла ГТД с ПП газа, ГТД с ПП+ТП, а также для сравнения ГТД простого цикла П приведены на рисунке 4. Степень повышения давления в ДК принята $\pi_{dk} = 2,5$, как наиболее оптимальная для получения наибольшего эффективного КПД η_e .

В ГТД с ПП газа эффективный КПД в диапазоне $\pi_k = 15 \dots 30$ практически такой же, как и у ГТД простого цикла. Не наблюдается существенного роста η_e и при увеличении π_k до 50. Удельная мощность $n_{уд}$ также растет незначительно.

Исправляет положение применение ТП совместно с ПП газа. Эффективный КПД в ГТД с ПП+ТП при $T_3 = 1373$ К увеличивается до 40 %, растет в такой же мере удельная мощность в цикле при оптимальных $\pi_k = 20 \dots 30$.

ГТД с промощаждением воздуха, промподогревом газа. На рисунке 5 изображена схема ГТД, включающая промощаждение воздуха между компрессорами, промежуточный подогрев газа между турбинами газогенератора, а также перерасширение газа в силовой турбине. Температура газа перед турбиной T2 выбрана равной начальной температуре газа T_3 в двигателе. Исследовались традиционная схема ГТД с ПО и ПП, и указанная схема с турбиной перерасширения.

Математическая модель для определения параметров циклов высокотемпературных ГТД с ПП газа между турбинами газогенератора [1] была дополнена введением ПО между компрессорами, с помощью которой определялось поле промежуточных величин и область оптимальных значений характеристик циклов.

Результаты исследования характеристик цикла ГТД с ПО и ПП, ГТД с ПО, ПП и ТП, а также для сравнения ГТД простого цикла П приведены на рисунке 6. Для исследования сложных циклов была применена ранее разработанная математическая модель ГТД с ПП, которая была дополнена ПО между компрессорами.

Из приведенных на рисунке 6 зависимостей видно, что введение ПО между компрессорами К1 и К2, ПП между турбинами Т1 и Т2 увеличивает удельную мощность двигателя по отношению к простому ГТД на 30...50 %, но эффективный КПД при $\pi_k=10...50$ ниже, чем в ГТД простого цикла.

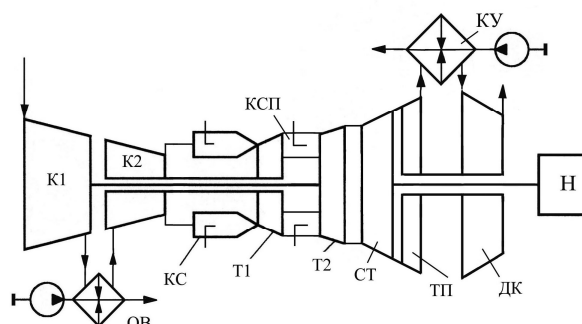


Рисунок 5 – Схема ГТД с промощением воздуха, промощением газа и турбиной перерасширения (2СН/ОП+СТКУ): К1 и К2 – компрессоры; КС – камера сгорания; КСП – КС промощения; Т1 и Т2 – турбины; СТ – силовая турбина; ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; Н – нагрузка; ОВ – охладитель воздуха; КУ – котел-утилизатор

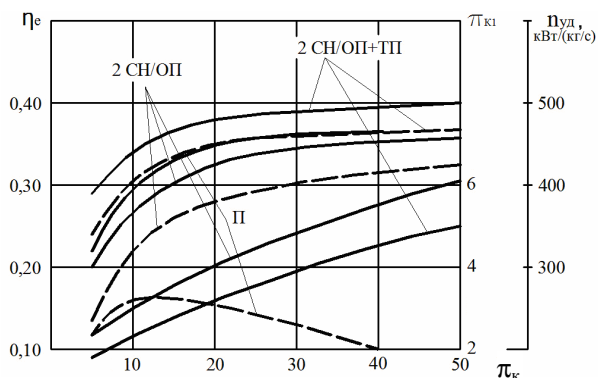


Рисунок 6 – Зависимости эффективного КПД η_e (сплошные линии), π_{k1} и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от π_k при $T_3 = 1373$ К, $k_{п1} = 1,0$ и $\pi_{дк} = 2,25$ и $1,0$

Таким образом, традиционное усложнение цикла высокотемпературного ГТД с охлаждением цикловым воздухом элементов двигателя не приводит к повышению экономичности сложного цикла ГТД. Это противоречит классическим представлениям об эффективности применения ПО и ПП в ГТД [2].

Применение ТП в ГТД с ПО и ПП улучшает характеристики двигателя: удельная мощность $n_{уд}$ увеличивается в среднем в 1,4...1,8 раза, эффективный КПД во всем диапазоне изменения π_k относительно выше на 8...12 %.

Дальнейшие исследования целесообразно провести с целью определения теплотехнических характеристик ГТД сложных циклов при работе их в когенерационном режиме.

Выводы

1. Традиционное усложнение цикла Брайтона за счет промощения воздуха в компрессоре двигателя, промощения газа между турбинами газогенератора увеличивает удельную мощность, однако не приводит к повышению эффективного КПД, в некоторых случаях снижает его.
2. Применение турбины перерасширения в ГТД сложного цикла ведет к повышению эффективного КПД и удельной мощности двигателя.

Библиографический список

1. Матвеев В.Т. Математическая модель для определения параметров циклов ГТД с промежуточным подогревом газа и силовой турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 80. — С. 91–94.
2. Шнеэ Я.И. Газовые турбины. Ч.1. Термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях / Я.И. Шнеэ, В.М. Капинос, И.В. Когляр. — К.: Вища школа, 1976. — 296 с.

Поступила в редакцию 20.10.2008 г.