

УДК 621.438

В.Т. Матвеев, профессор, д-р техн. наук,**В.А. Очеретяний, доцент, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ НА ЧАСТИЧНЫХ ВИНТОВЫХ НАГРУЗКАХ**

Представлены результаты исследования управления рабочим процессом в газотурбинном двигателе (ГТД) посредством применения регулируемого соплового аппарата перед силовой турбиной в ГТД с регенерацией теплоты. Предложенный способ позволяет обеспечить высокую энергоэффективность ГТД с регенерацией теплоты на переменных режимах.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, регенерация теплоты, турбина перерасширения.

Введение. Повышение эффективности ГТД путем усложнения цикла производится на базе цикла Брайтона и цикла с регенерацией теплоты. Усложнение цикла Брайтона посредством введения в тепловую схему промежуточного охлаждения (ПО) воздуха между каскадами компрессоров, промежуточного подогрева (ПП) газа между турбинами газогенератора в отдельности и вместе не приводит к повышению эффективного КПД (в некоторых случаях снижается), увеличивается только удельная мощность двигателя [1].

Цель исследования — повышение энергоэффективности ГТД с регенерацией теплоты на номинальных и переменных режимах работы.

Применение внутрициклового утилизации теплоты (традиционной регенерации теплоты) приводит к повышению эффективного КПД приводного двигателя (рисунок 1), уменьшает оптимальную степень повышения давления π_k в двигателе, уменьшает удельную мощность $n_{уд}$ двигателя (рисунок 2). На рисунке 2 обозначено: П — простой цикл, Р — цикл с регенерацией, П+ТП — простой цикл с турбиной перерасширения.

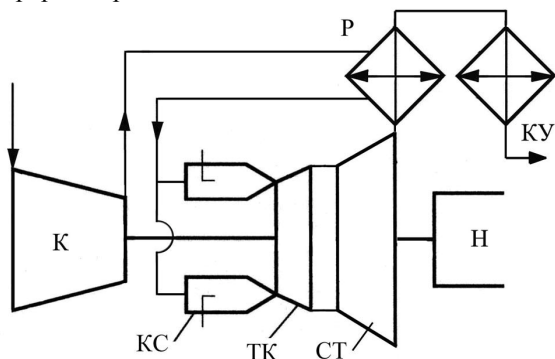


Рисунок 1 — Схема ГТД с регенерацией теплоты (1СН/Р): К — компрессор; КС — камера сгорания; ТК — турбина компрессора; СТ — силовая турбина; Р — регенератор; КУ — котел-утилизатор; Н — нагрузка

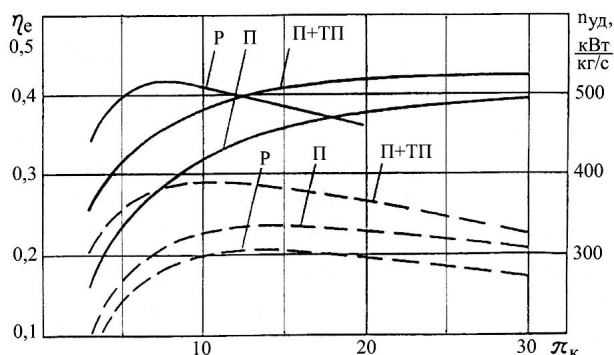


Рисунок 2 — Зависимости эффективного КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от π_k при $T_3 = 1473 \text{ К}$, $\pi_{dk} = 2,25$ и $\sigma = 0,80$

Сравнение проводится при степени регенерации $\sigma = 0,8$ как более приемлемой на сегодняшний день по массогабаритным и весовым характеристикам. Начальная температура газа $T_3 = 1473 \text{ К}$ может быть принята как предельно допустимая и требующая еще доработки высокотемпературных элементов двигателя для обеспечения требуемого ресурса.

Такие же результаты по эффективному КПД можно получить при достаточно освоенной начальной температуре $T_3 = 1373 \text{ К}$, но при этом степень регенерации потребуется равной 0,85, а удельная мощность будет несколько меньше.

Здесь уместно напомнить о нетрадиционном способе повышения эффективности ГТД посредством применения турбины перерасширения. Цикл Брайтона (простой цикл) совместно с турбиной перерасширения достигает по эффективному КПД уровня ГТД с регенерацией, а по удельной мощности превосходит относительно на 30 % (см. рисунок 2).

Более глубокую утилизацию теплоты возможно осуществить при общей энергетической эффективности в ГТД с турбиной перерасширения в сочетании с регенерацией теплоты. На рисунке 3 изображена схема ГТД с ТП и Р теплоты [2, 3].

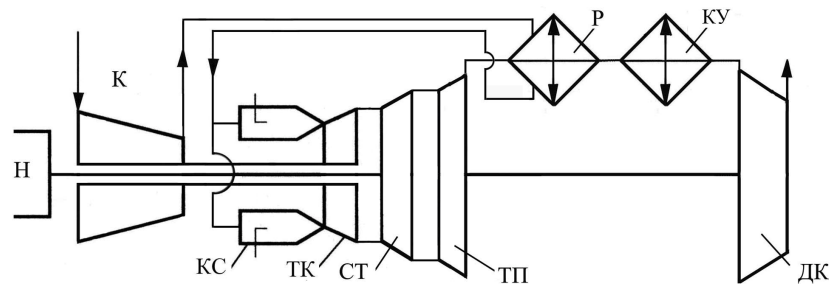


Рисунок 3 – Когенерационный ГТД с ТКУ и регенерацией теплоты – схема со свободным ТКУ (схема 1СН/Р + СТКУ)

Газ, расширяясь в турбине перерасширения (ТП) до давления ниже атмосферного, производит дополнительную работу, охлаждается сначала в регенераторе, потом в охладителе газа (ОГ) и затем дожимающим компрессором (ДК) выбрасывается в атмосферу.

Необходимо отметить, что удельная мощность $n_{уд}$ ГТД с ТП и Р при оптимальных значениях π_k в 1,3...1,5 раза больше, чем в ГТД с Р, что положительно влияет на массогабаритные характеристики ГТД, включающие в себя теплообменные аппараты.

Турбина перерасширения совместно с дожимающим компрессором и теплообменниками между ними образуют турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). ГТД с ТКУ и Р образует установку когенерационного типа, так как охладитель газа выполняет роль теплогенератора (котла утилизатора), теплотехнический КПД ($\eta_{тп}$) в которой достигает значений 75...85 %.

Характеристики ГТД с ТП и Р теплоты на переменных режимах. Главный двигатель в судовом пропульсивном комплексе, для которого характерна винтовая нагрузка, является всережимным, поэтому желательно обеспечить высокую энергетическую эффективность его на переменных режимах работы при изменении скорости хода судна.

Ранее было установлено [4], что на переменном режиме при всех значениях относительно мощности $\bar{N}_e$ эффективный КПД ГТД с ТП и Р существенно выше, чем в ГТД простого цикла (схема 2СН).

На рисунке 3 приведена схема когенерационного ГТД со свободным ТКУ (СТКУ) и регенерацией теплоты, где силовая турбина механически не связана с турбиной перерасширения. Возможно применение ГТД с заблокированным ТКУ (БТКУ) и регенерацией теплоты, где силовая турбина механически связана с ТКУ.

На частичных нагрузках в ГТД с СТКУ и Р эффективный КПД несколько выше, чем в ГТД с БТКУ и Р, более стабильно генерируется тепловая энергия. Поэтому для рассмотрения вопроса дальнейшего повышения эффективного КПД на частичных нагрузках выбран ГТД с СТКУ и Р [5].

Изменять эффективный КПД ГТД с Р теплоты можно посредством применения регулируемого соплового аппарата (РСА) в силовой турбине. Такой способ позволяет перераспределить теплоперепад между турбинами, изменять расход газа через турбины, приблизить регулирование к количественному типу.

Расчет характеристик ГТД с регенерацией теплоты и турбиной перерасширения производился по методике, предложенной в работе [5], с учетом применения РСА в силовой турбине.

Исследование характеристик ГТД с регенерацией производилось в условиях, где свободная силовая турбина воспринимала винтовую нагрузку. Что касается степени регенерации теплоты, то она с уменьшением нагрузки несколько увеличивается, причем незначительно, поэтому при расчетах ее принимают постоянной.

На рисунках 4 и 5 показаны зависимости характеристик когенерационных ГТД с регенерацией теплоты (схема 1СН/Р), ГТД с регенерацией теплоты и турбиной перерасширения (схема 1СН/Р+ТП) от относительной эффективной мощности $\bar{N}_e$.

Общее положительное свойство ГТД с Р и ГТД с Р и ТП то, что на частичных нагрузках в широком диапазоне нагружения эффективный КПД (η_e) более высокий, чем в ГТД простого цикла (схема 2СН). На номинальной нагрузке теплотехнические (общие) КПД ($\eta_{тп}$) для рассматриваемых схем примерно равны, однако на частичных нагрузках каждый ГТД в зависимости от $\bar{N}_e$ имеет свои закономерности изменения теплотехнических характеристик (рисунок 5).

На частичных нагрузках посредством РСА можем уменьшить расход рабочего тела $\bar{G}_k$ через двигатель, что на рисунке 4 показано прерывистыми линиями.

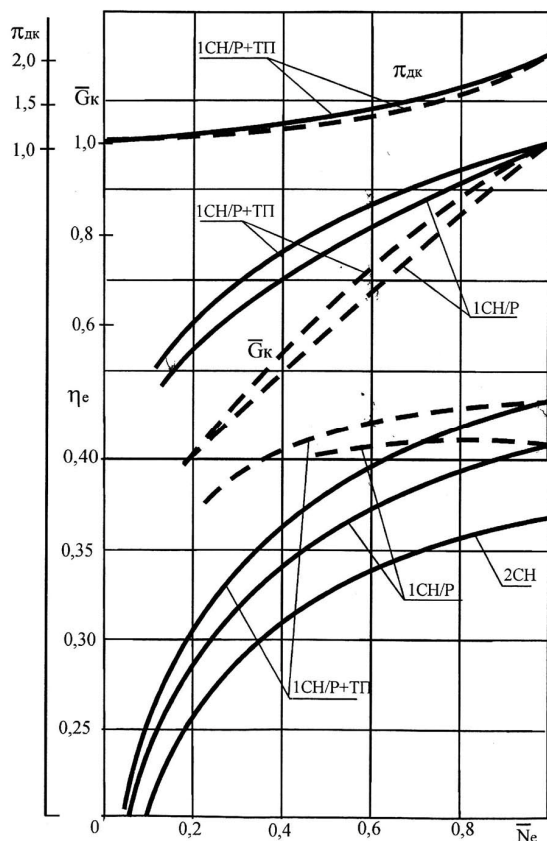


Рисунок 4 – Характеристики циклов ГТД с Р на частичных винтовых нагрузках при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 7$ и $\pi_{dk} = 2,25$

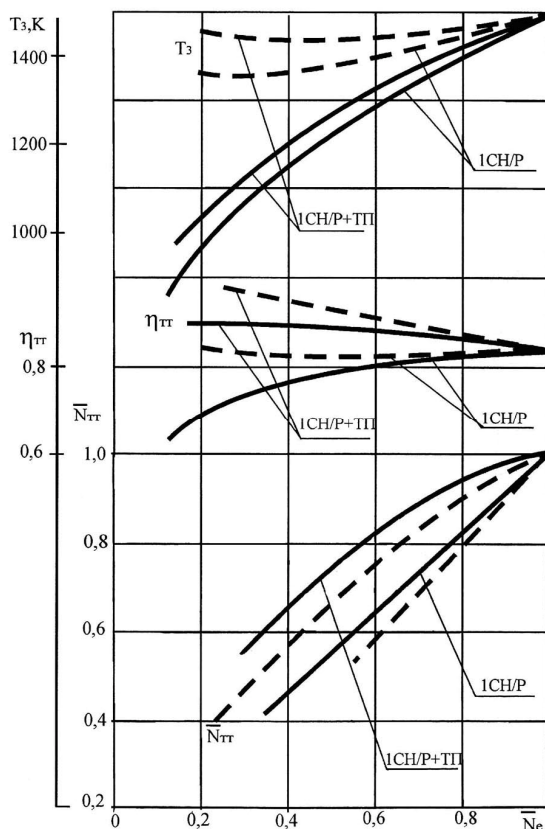


Рисунок 5 – Теплотехнические характеристики ГТД с Р на частичных винтовых нагрузках при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 7$ и $\pi_{dk} = 2,25$

При этом наблюдается увеличение эффективного КПД η_e при уменьшении $\bar{N}_e$ (прерывистые линии на рисунке 4) как для ГТД с Р, так и для ГТД с Р и ТП. Объясняется это тем, что начальная температура газа T_3 на частичных нагрузках мало отличается от ее значения на номинальном режиме (рисунок 5), поэтому параметры рабочего цикла приближаются к оптимальным значениям при полном нагружении ГТД.

Что касается теплотехнических характеристик, теплотехнический КПД η_{tt} обеих схем ГТД на частичных нагрузках несколько растет, при этом относительная тепловая мощность ($\bar{N}_{tt}$) уменьшается за счет перераспределения потоков энергии в пользу механической.

Эффективность ГТД с регенерацией теплоты, работающих в составе когенерационной установки. Энергия топлива, израсходованного в когенерационной установке, исходя из закона

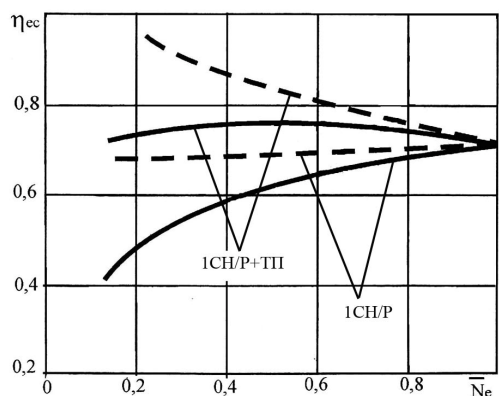


Рисунок 6 – Эффективный КПД в когенерационных ГТД с Р (η_{ec}) на частичных винтовых нагрузках при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 7$ и $\pi_{dk} = 2,25$

сохранения энергии, состоит из выработанной механической и тепловой энергии, а также потерь энергии во внешнюю среду. Применяя принцип разделения энергии топлива по генерируемым видам энергии, можно определить величину эффективного КПД (η_{ec}) двигателя в когенерационной установке. Эффективный КПД (η_{ec}) в двигателе когенерационной установки определяется по формуле:

$$\eta_{ec} = n_e / (q - n_t),$$

где n_e – удельная эффективная мощность; n_t – удельная тепловая мощность; q – удельная теплота, подведенная в цикл топливом.

С учетом всех потерь в цикле эффективный КПД двигателя когенерационной установки с регенерацией теплоты на номинальном режиме составит 71 % (рисунок 6).

Если с уменьшением мощности $\eta_{\text{св}}$ в ГТД с Р уменьшается, то $\eta_{\text{св}}$ в ГТД с Р и ТП остается стабильным на всех режимах нагружения. При воздействии РСА $\eta_{\text{св}}$ в ГТД с Р становится стабильным, а $\eta_{\text{св}}$ в ГТД с Р и ТП даже возрастает с увеличением мощности.

Дальнейшие исследования желательно выполнить по решению задачи стабилизации относительной тепловой мощности $\bar{N}_{\text{ТТ}}$ на частичных нагрузках при воздействии на рабочий процесс РСА.

Выводы

На всех режимах нагружения в ГТД с Р и ТП эффективный КПД выше, чем в ГТД с Р теплоты. В ГТД с Р и ТП эффективный КПД в составе когенерационной энергоустановки достигает значения 70 % и более при стабильном теплотехническом КПД на уровне 80...85 %. При воздействии РСА на рабочий процесс в ГТД с Р и ТП энергоэффективность когенерационной установки на частичных нагрузках остается высокий и стабильный.

Библиографический список использованной литературы

1. Матвеев В.Т. Перспективы повышения эффективности высокотемпературного газотурбинного двигателя усложнением цикла Брайтона / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный, А.Г. Андриец // Вестник СевНТУ. Сер. Энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2009. — Вып. 97. — С. 113–115.
2. Матвеев В.Т. Приводные ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты / В.Т. Матвеев, В.П. Трошин, А.А. Филоненко, О.С. Кучеренко // Газотурбинные технологии. — Рыбинск, 2005. — Вып. № 6 (41). — С. 42–44.
3. Матвеев В.Т. Перспективы повышения эффективности ГТД с регенерацией теплоты усложнением цикла / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный, А.Г. Андриец // Вестник СевНТУ. Сер. Энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 106. — С. 120–123.
4. Матвеев В.Т. Гибкие когенерационные газотурбинные двигатели с ТКУ и регенерацией теплоты в судовом пропульсивном комплексе / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный, В.В. Раков // Вестник СевНТУ. Сер. Энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2009. — Вып. 97. — С. 116–119.
5. Матвеев В.Т. Работа ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты на частичных нагрузках в судовом пропульсивном комплексе / В.Т. Матвеев // Збірник наукових праць УД МТУ. — Миколаїв, 1999. — № 2 (362). — С. 60–68.

Поступила в редакцию 22.03.2011 г.

Матвієнко В.Т., Очеретяний В.А. Ефективність роботи газотурбінного двигуна з регенерацією теплоти на часткових гвинтових навантаженнях

Представлено результати дослідження управління робочим процесом у газотурбінному двигуні (ГТД) за допомогою застосування регульованого соплового апарату перед силовою турбіною в ГТД з регенерацією теплоти. Запропонований метод дозволяє забезпечити високу енергоефективність ГТД з регенерацією теплоти на змінних режимах.

Ключові слова: газотурбінний двигун, регенерація теплоти, турбіна перерозширення.

Matviienko V.T., Ocheretyaniy V.A. Efficiency of performance of gas turbine engine with heat regeneration on partial loading

The results of research on workflow management in a gas turbine engine through the use of adjustable nozzle block to the power turbine in GTE with regeneration of heat are provided. The proposed method allows to ensure high energy efficiency GTE with regeneration of heat for variable modes.

Keywords: gas turbine of engines, heat regeneration, turbine overexpansion.