

УДК 621.438

В.Т. МАТВЕЕНКО, В.А. ОЧЕРЕТЯНЫЙ*Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина***РАБОТА КОМБИНИРОВАННЫХ ГТУ С ВОЗДУШНЫМИ УТИЛИЗИРУЮЩИМИ ТУРБИННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ**

Представлены результаты исследований и разработок комбинированных газотурбинных установок (КГТУ) с воздушными утилизирующими турбинами на переменных режимах работы. В работе рассмотрены различные конструктивные схемы формирования КГТУ с утилизирующей воздушной турбиной (ВТ) в сочетании с основным ГТД, который может быть простого цикла, а также в двухконтурном исполнении. Показано, что как на номинальных, так и на переменных нагрузках эффективный КПД КГТУ выше, чем в ГТД простого цикла. Выбор конструктивной схемы КГТУ с ВТ зависит от области применения установки и условий ее функционирования. Для работы на всех режимах более приспособлена КГТУ с основным двухконтурным ГТД.

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

Введение

Повышение энергоэффективности газотурбинного двигателя (ГТД) возможно за счет превращения части теплоты выхлопных газов в механическую работу в дополнительном двигателе, работающем по газотурбинному циклу. Эффективность комбинированных газотурбинных установок (ГТУ), построенных на утилизационных газотурбинных технологиях, рассмотрена в работе [1].

В качестве двигателя, который работает за счет утилизации теплоты, выступает дополнительный ГТД (ГТД_{доп}), который комбинируется с основным ГТД (ГТД_{осн}), входящим в состав ГТУ. При этом возможны два варианта передачи теплоты отработавших газов в ГТД_{доп}:

- подогревом рабочего тела (воздуха) в теплообменнике (подогревателе воздуха) перед турбиной ГТД_{доп};

- использованием отработавших газов в качестве рабочего тела в турбине перерасширения (ТП) ГТД_{доп}.

На рис. 1 приведена схема комбинированной ГТУ (КГТУ), нагруженной на гребной винт. Установка состоит из основного ГТД простого цикла и дополнительного ГТД. В ГТД_{доп} сжатый после компрессора (К) воздух нагревается в подогревателе воздуха (ПВ) за счет теплоты отработавших газов ГТД_{осн}. В рассматриваемой схеме основной ГТД – многовальтовый и через редуктор (Р) связан с воздушной турбиной, что обеспечивает совместную работу на общую нагрузку, которая может быть винтового типа в составе судового пропульсивного комплекса.

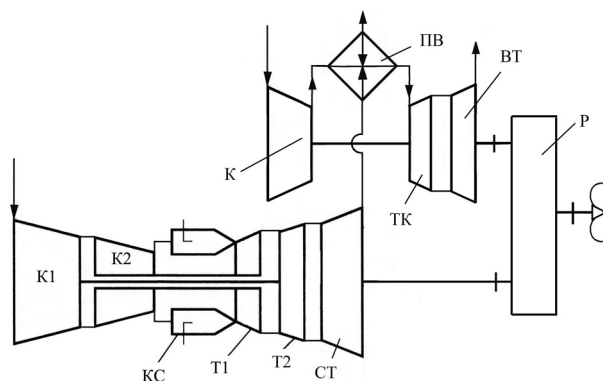


Рис. 1. Схема КГТУ с ГТД_{доп} с воздушной турбиной: К1 и К2 – компрессоры; КС – камера сгорания; Т1 и Т2 – турбины привода компрессоров; СТ – силовая турбина; ПВ – подогреватель воздуха; ВТ – воздушная турбина; Р – редуктор; ТК – турбина компрессора К

1. Характеристики КГТУ с воздушными утилизирующими турбинными двигателями

Для комбинированной ГТУ с утилизацией теплоты отработавших газов в ГТД_{доп} эффективный КПД (η_e) определяется по формуле:

$$\eta_e = (H_e + H_{ed}) / Q,$$

где H_e и H_{ed} – эффективные работы, полученные в ГТД_{осн} и ГТД_{доп}; Q – подведенная теплота в цикл.

При равенстве расходов воздуха в схеме рис. 1 повышение КПД ГТУ осуществляется за счет увеличения удельной мощности (n_{ed}) ГТД_{доп}.

Определение параметров цикла ГТД_{доп} с воздушной турбиной было проведено в работе [2] и при

больших вариантах усложнения цикла ГТД_{доп} в работе [3]. Температура газа на выхлопе ГТД_{осн} варьировалась от 673 К до 873 К. Оптимальная степень повышения давления $\pi_{кд}$ ГТД_{доп} находится в пределах от 2,5 до 4,0 при конструктивно достижимых характеристиках турбомашин и теплообменных аппаратов.

Характеристики комбинированных ГТУ приведены в таблице при равенстве потерь на выхлопе ГТД_{осн} (имеется наличие теплообменника). ГТД простого цикла в таблице представлен в качестве когенерационной установки, имеющей котел-утилизатор.

Таблица
Результаты расчетов основных характеристик комбинированных ГТУ

Обозначение ГТУ Наименование	Значение		
	ГТД _{осн}	ГТД _{осн} +ВТ	ГТД _{осн} +ТП
Начальная температура газа в основном ГТД при $\pi_{к}=22$, К	1473	1473	1473
Температура газа на выходе из основного ГТД, К	725,0	723,3	690,4
Степень повышения давления в дополнительном ГТД	—	3,5	2,25
Удельная мощность дополнительного ГТД, кВт/(кг/с)	—	32,7	39,0
Удельная мощность (общая) ГТУ, кВт/(кг/с)	296,1	329,2	335,1
Эффективный КПД ГТУ, %	36,8	40,4	41,6
Удельная тепловая мощность, кВт/(кг/с)	373	—	300,6
Теплотехнический (общий) КПД, %	83,2	—	79,0

2. Конструктивные схемы комбинированных ГТУ с УТД

Для комбинированной ГТУ с ГТД_{доп} с ВТ в качестве ГТД_{доп} может быть выбран двухвальный двигатель со свободной воздушной турбиной (рис. 1), который более предпочтителен для всережимной судовой пропульсивной установки.

Возможно применение ГТД_{доп} одновальной конструкции, которая может быть приемлема в энергетической комбинированной ГТУ.

Для комбинированной ГТУ с ГТД_{доп} с ВТ в качестве основного ГТД_{осн} может быть применен

двухконтурный ГТД со степенью двухконтурности примерно единица. Такое решение было предложено в работе [2]. На рис. 2 приведена схема КГТУ, в составе которой применен двухконтурный газотурбинный двигатель, половина сжатого воздуха от компрессора К1 подогревается за счет теплоты выхлопных газов в ПВ и далее подается в силовую воздушную турбину.

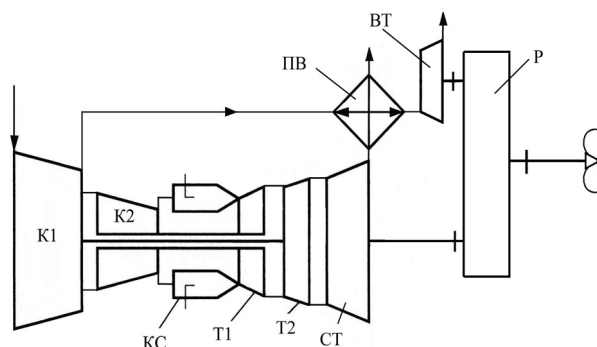


Рис. 2. Схема комбинированной ГТУ с двухконтурным ГТД_{осн} и с воздушной турбиной: К1 и К2 – компрессоры; КС – камера сгорания; Т1 и Т2 – турбины привода компрессоров; СТ – силовая турбина; ПВ – подогреватель воздуха; ВТ – воздушная турбина; Р – редуктор

3. Переменные режимы работы комбинированных ГТД с ВТ

Одной из важнейших характеристик ГТУ является изменение эффективного КПД установки в зависимости от мощности на переменных режимах, а в когенерационных ГТУ – тепловой мощности, а также теплотехнического (общего) КПД. Изменение экономичности установки при частичных нагрузках может быть весьма различным в зависимости от конструктивных схем ГТУ.

На рис. 4 для ГТУ с ГТД_{доп} с ВТ (схема П+ВТ) изменение эффективного КПД η_e , относительной удельной мощности $\bar{N}_{ед}$ ГТД_{доп}, относительного расхода воздуха G_{kd} ГТД_{доп} в зависимости от относительной эффективной мощности $\bar{N}_e$ ГТД_{осн}. Для сравнения на рис. 3 приведены характеристики ГТД простого цикла (схема П): эффективный КПД η_e и относительный расход воздуха G_k .

Эффективный КПД КГТУ с ГТД_{доп} с ВТ при значениях относительной мощности $\bar{N}_e=0,3...1,0$ выше, чем в ГТД простого цикла.

После запуска ГТД_{осн} (рис. 1) и выходе на режим $\bar{N}_e \approx 0,4$ необходимо запускать ГТД_{доп} с ВТ, что является особенностью данной схемы и неудобством в эксплуатации установки во всережимном использовании.

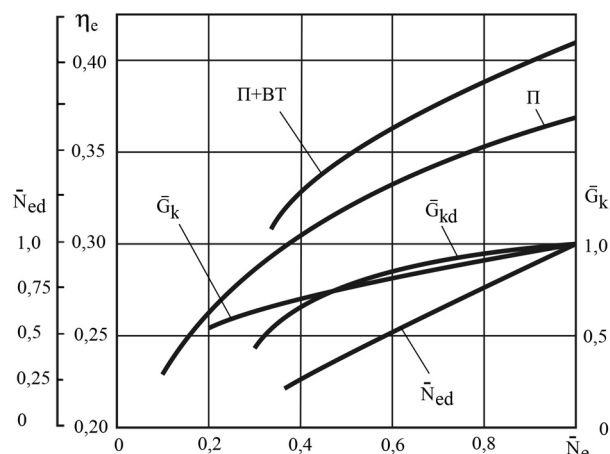


Рис. 3. Параметры комбинированной ГТУ (П+ВТ) и цикла ГТД_{доп} с ВТ на переменном режиме в зависимости от относительной мощности $\bar{N}_e$ ГТД_{осн}

На рис. 4 показано изменение параметров цикла ГТД_{доп} с ВТ: степень повышения давления в компрессоре π_{kd} и расширения в силовой турбине π_{T2d} , а также температуры воздуха T_{3d} перед ТК и выхода T_{4d} в зависимости от относительной мощности $\bar{N}_{ed}$.

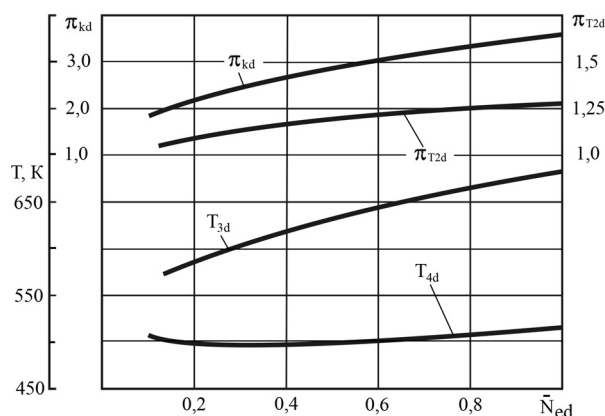


Рис. 4. Параметры цикла ГТД_{доп} с ВТ на переменном режиме в зависимости от относительной мощности $\bar{N}_{ed}$ ГТД_{доп}

Температура выхода воздуха T_{4d} из ГТД_{доп} с ВТ на всех режимах работы практически постоянна.

На рис. 5 показаны изменения эффективного КПД η_e ГТУ с ВТ (П+ВТ) и ГТД простого цикла (П) в зависимости от изменения относительной эффективной мощности силовой турбины ГТД_{осн} $\bar{N}_e$, а также параметры работы элементов ГТУ с ВТ на частичных режимах нагружения [1].

Эффективный КПД η_e ГТУ с ВТ выше, чем в ГТД простого цикла, особенно (относительно) на частичных нагрузках. Необходимо отметить, в ГТУ

с двухконтурным ГТД_{осн} мощности СТ и ВТ на номинальном режиме примерно равны. Мощность СТ ГТД_{осн} уменьшается быстрее, чем мощность ВТ. На рис. 5 удельная мощность СТ обозначена $n_{ст}$, а ВТ – $n_{вт}$.

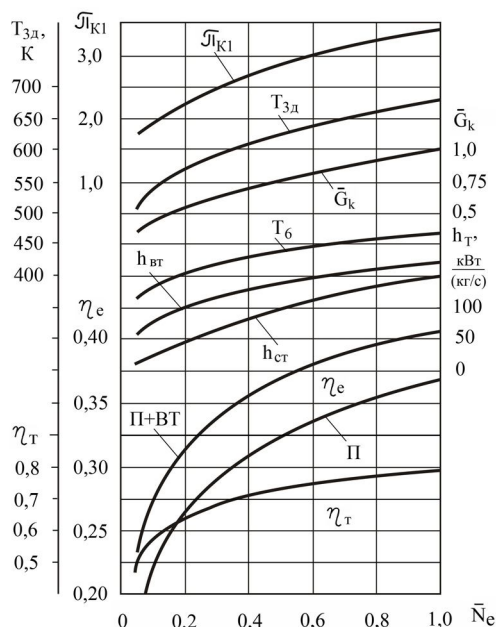


Рис. 5. Характеристики ГТУ с двухконтурным ГТД_{осн} и ВТ на частичных (винтовых) нагрузках при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 22$ и $\pi_{kd} = 3,43$

На холостом ходу ГТД_{осн} ВТ развивает избыточную мощность, так как работает двухконтурный компрессор К1 и температура T_{3d} перед ВТ достаточно высокая.

Значения π_{k1} и $\bar{G}_k$ позволяют определить эффективность и устойчивость работы выбранного компрессора К1 на переменном режиме.

На рис. 5 указан параметр η_T , который показывает степень использования энергии топлива в ГТД_{осн} и в подогревателе воздуха второго контура. Температура газа T_6 (рис. 5) за ПВ указывает на возможность дальнейшей утилизации теплоты выхлопных газов ГТД_{осн}.

Заключение

1. На базе высокотемпературных ГТД возможно создать комбинированные ГТУ с утилизирующими турбинными двигателями, обладающие высокой экономичностью.

2. Выбор конструктивной схемы КГТУ с ВТ зависит от области применения установки и условий ее функционирования.

3. Во всережимной судовой энергоустановке предпочтительно применять комбинированную ГТУ

с основным двухконтурным ГТД и воздушной турбиной, в которой нет необходимости на малых нагрузках запускать ГТД_{доп} с ВТ.

Литература

1. Матвеев В.Т. Энергоэффективность комбинированной ГТУ с утилизирующими турбинными двигателями / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, 2010. – № 7 (88). – С. 44–48.

2. Матвеев В.Т. Сравнение эффективности судовых комбинированных газотурбинных установок / В.Т. Матвеев // Судовые энергетические установки: сб. науч. трудов НКИ. – Николаев, 1990. – С. 48–56.

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

Поступила в редакцию 27.05.2011

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

РОБОТА КОМБІНОВАНИХ ГТУ З ПОВІТРЯНИМИ УТИЛІЗУЮЧИМИ ТУРБІННИМИ ДВИГУНАМИ НА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ

В.Т. Матвієнко, В.А. Очеретяний

Представлені результати досліджень і розробок комбінованих газотурбінних установок (КГТУ) з повітряними турбінами утилізують на змінних режимах роботи. У роботі розглянуті різні конструктивні схеми формування КГТУ з утилізуючою повітряною турбіною (ПТ) у поєднанні з основним ГТД, який може бути простого циклу, а також у двоконтурному виконанні. Показано, що як на номінальних, так і на змінних навантаженнях ефективний ККД КГТУ вище, ніж у ГТД простого циклу. Вибір конструктивної схеми КГТУ з ПТ залежить від області застосування установки і умов її функціонування. Для роботи на всіх режимах більш пристосована КГТУ з основним двоконтурним ГТД.

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

WORK COMBINED WITH STU DISPOSE OF AIRCRAFT TURBINE ENGINE FOR VARIABLE CONDITIONS

V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyaniy

The results of research and development of combined gas turbine (CGTE) with air utilizing turbines at varying operating conditions are presents. The paper discusses various design schemes of the formation of CGTE with recycling air turbine (AT) in combination with primary GTE, which can be a simple cycle, as well as double-circuit design. It is shown that in both the nominal and variable loads the effective efficiency CGTE is higher than in the GT of a simple cycle. The choice of the constructive scheme CGTE with AT depends on the application installation and conditions of its functioning. To work in all ranges to the main CGTE turbofan gas turbine engine is more suited.

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

Матвеев 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.