

УДК 621.438

**В.Т. МАТВЕЕНКО, В.А. ОЧЕРЕТЯНЫЙ***Севастопольский национальный технический университет, Украина***РАБОТА КОГЕНЕРАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ПРОМПОДОГРЕВОМ ГАЗА ПЕРЕД СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ  
ПЕРЕРАСШИРЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ**

Представлены результаты исследований теплотехнических характеристик когенерационного ГТД с промежуточным подогревом (ПП) газа перед силовой турбиной перерасширения (СТП). Показано, что в ГТД с ПП перед СТП высокая степень использования энергии топлива сохраняется на всех режимах нагружения и есть возможность гибко регулировать объемы поставляемой энергии.

**газотурбинный двигатель, промежуточный подогрев газа, турбина перерасширения, когенерация****Введение**

Тепловая и конструктивная схема когенерационной энергоустановки, обеспечивающей энергией обособленные объекты промышленности и коммунального хозяйства, должна быть приспособлена к обеспечению переменного объема электрической и тепловой энергии, поставляемой потребителям.

Одновременно энергетическая установка в целом должна обладать высоким эффективным КПД и общим высоким уровнем использования энергии топлива. Такими свойствами обладает газотурбинный двигатель (ГТД) с турбиной перерасширения (ТП), а с введением промежуточного подогрева (ПП) газа в ГТД значительно увеличивается удельная мощность двигателя [1].

На рис. 1 изображена схема ГТД с ПП газа перед силовой турбиной перерасширения. ПП газа производится во второй камере сгорания (КС2), установленной между газогенератором и СТП, механически не связанных между собой. Перерасширение газа за силовой турбиной осуществляет дожимающий компрессор (ДК), перед которым газ охлаждается в охладителе газа (ОГ). В целом ТП, ДК и ОГ между ними образуют турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Охладитель газа выполняет роль теплогенератора, превращая ГТД в установку когенерационного типа.

На диаграмме T-S (рис. 2) представлен цикл высокотемпературного ГТД с ПП и СТП, где реальные процессы расширения газа в турбинах, охлаждаемых цикловым воздухом, представлены эквивалентными процессами: 3см-4.1 – в турбине Т1; 4.1см-4.2 – в турбине Т2; 4.3см-5 – в СТП. Эквивалентные температуры газа на входе в охлаждаемые турбины определяются смешением газа на входе в рабочее колесо турбины и части воздуха, отбираемого на охлаждение сопловых и рабочих лопаток турбин.

**Методика исследования ГТД с ПП  
перед СТП при переменном режиме**

Расчет характеристик ГТД с ПП перед СТП производился по методике, предложенной в работе [2], с учетом особенностей для схемы с промежуточным подогревом газа.

При исследовании характеристик тепловых схем ГТД с ПП перед СТП (схема 2СПН) были рассмотрены две конструктивные схемы. Схема ГТД (2СПН) с блокированным ТКУ (БТКУ), в которой турбина перерасширения блокирована с силовой турбиной (рис. 1). Схема ГТД (2СПН) со свободным ТКУ (СТКУ), в которой ТКУ механически не связана с силовой турбиной. Для сравнения определялись характеристики на частичных нагрузках традиционной схемы ГТД простого цикла.

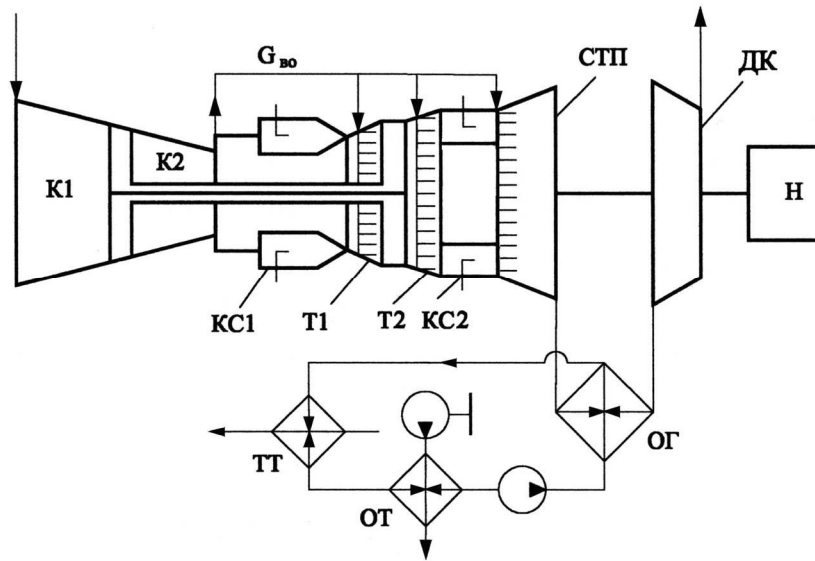


Рис. 1. Схема ГТД с промподогревом газа перед силовой турбиной перерасширения:  
 К1 и К2 – компрессоры; КС1 – основная камера сгорания; КС2 – камера сгорания промподогрева;  
 Т1 и Т2 – турбины; СТП – силовая турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор;  
 ОГ – охладитель газа; Н – нагрузка; ТТ – теплофикационный теплообменник;  
 ОТ – охладитель теплоносителя

Анализ характеристик когенерационных ГТД (2СПН) производился при различных начальных температурах газа  $T_3$ , оптимальных степенях повышения давления в компрессоре  $\pi_k$ , дожимающем компрессоре  $\pi_{dk}$  и других исходных данных [1, 3]. Исследования характеристик ГТД (2СПН) на частичных нагрузках производились при пропорциональном изменении температур газа перед турбинами газогенератора и силовой турбиной.

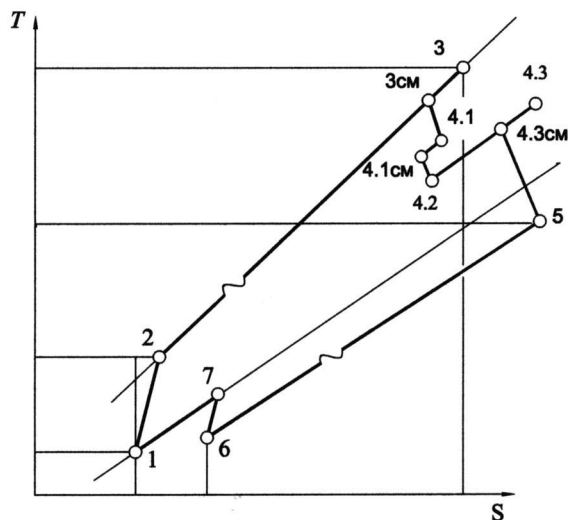


Рис. 2. Цикл высокотемпературного ГТД с промподогревом газа и силовой турбиной перерасширения

### Результаты исследований характеристик конструктивных схем ГТД с ПП перед СТП при переменном режиме

На базе разработанной методики было разработано программное обеспечение и произведены расчеты на ЭВМ переменных режимов ГТД и сопоставление результатов для двигателей, выполненных по различным схемам.

На рис. 3 показаны характеристики циклов ГТД (схемы 2СПН + СТКУ и 2СПН + БТКУ) от относительной эффективной мощности  $\bar{N}_e$ . На рис. 3 показаны для сравнения характеристики на частичных нагрузках ГТД простого цикла (схема 2СН).

При значениях относительной мощности  $\bar{N}_e = 0,2 \dots 1,0$  эффективный КПД  $\eta_e$  в схеме ГТД (2СПН) с БТКУ выше, чем в ГТД простого цикла, а в ГТД (2СПН) с СТКУ в диапазоне  $\bar{N}_e = 0,7 \dots 1,0$ . Это объясняется тем, что в ГТД (2СПН) с БТКУ на всех режимах ДК создает почти постоянное разрежение за ТП. Это также подтверждают приведенные на рис. 3 зависимости расхода теплоты топлива  $Q$  [кДж/с] от  $\bar{N}_e$  для различных схем ГТД. Таким об-

разом, применение ГТД по схеме 2СПН+БТКУ предпочтительно для сети с большим изменением по величине электрической нагрузки.

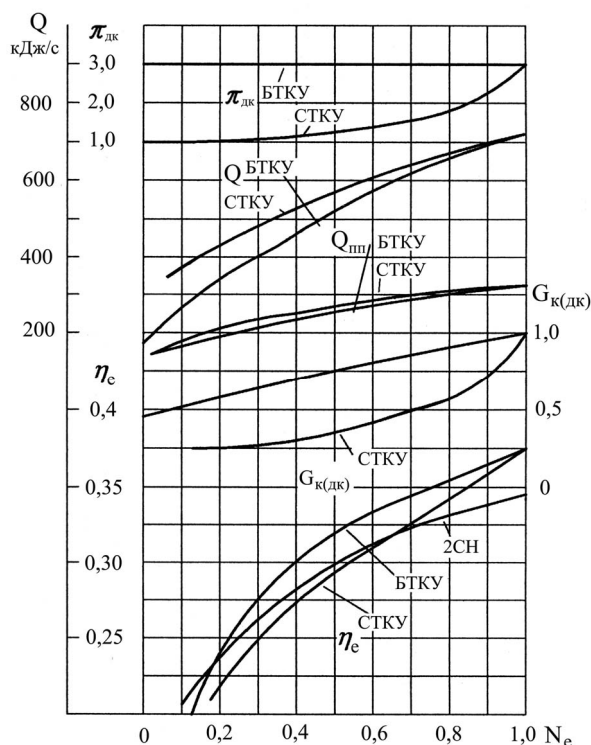


Рис. 3. Характеристики ГТД (схема 2СПН) с ТКУ на частичных нагрузках при  $T_{03} = 1373 \text{ К}$ ,  $\pi_{0к} = 19$  и  $\pi_{0к} = 3$  (нагрузка генераторная): БТКУ – схема 2СПН с заблокированным ТКУ; СТКУ – схема 2СПН со свободным ТКУ

Результаты расчетов теплотехнических характеристик ГТД (2СПН) и ТКУ на частичных генераторных нагрузках представлены на рис. 4.

Установлено, что в ГТД (2СПН) с СТКУ на всех режимах теплотехнический (общий) КПД  $\eta_{\text{итт}}$  остается высоким и даже несколько растет с уменьшением  $\bar{N}_e$ . Это объясняется ростом температуры  $T_5$  за ТП, что приводит к увеличению тепловой мощности установки.

В ГТД (2СПН) с СТКУ теплотехническая мощность  $\bar{N}_{\text{итт}}$  на режиме  $\bar{N}_e = 0,6 \dots 1,0$  по величине равна номинальному значению, что делает его применение предпочтительным для стабильного обеспечения объектов тепловой энергией при переменной потребности в электрической.

Теплотехнические характеристики ГТД (2СПН) с БТКУ, как видно из рис. 4, совпадают с таковыми в ГТД простого цикла, в котором с уменьшением мощности двигателя резко падает тепловая мощность и, соответственно, теплотехнический КПД, особенно на малых нагрузках.

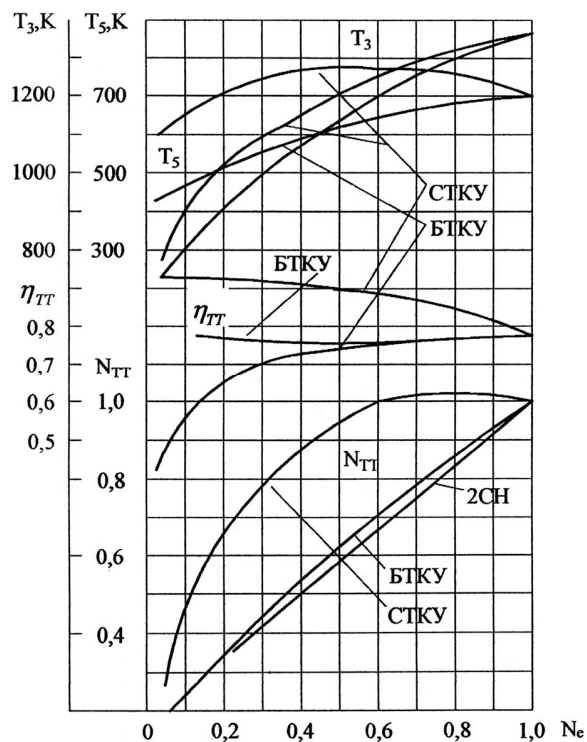


Рис. 4. Теплотехнические характеристики ГТУ (схема 2СПН) с ТКУ на частичных нагрузках при  $T_{03} = 1373 \text{ К}$ ,  $\pi_{0к} = 19$  и  $\pi_{0к} = 3$  (нагрузка генераторная): БТКУ – схема 2СПН с заблокированным ТКУ; СТКУ – схема 2СПН со свободным ТКУ

В ГТД (2СПН) с БТКУ увеличить выработку тепловой энергии на частичных нагрузках возможно за счет изменения рабочего процесса в газотурбинном двигателе.

Регулируя степень повышения давления в ДК, на частичных нагрузках работающего при  $n_{0к} = \text{const}$ , можно изменить тепловую мощность энергоустановки.

Ранее предлагаемый метод был апробирован при разработке тепловых схем энергетических ГТУ для обеспечения энергией технологического оборудования морских буровых платформ [4].

Для переменного расхода газа через ГТД воспользуемся формулой

$$\pi_{\partial_k} = (\pi_{0\partial_k} - 1) \left( A / \bar{G}_k \right)^{2S} + 1, \quad (1)$$

где  $\pi_{0\partial_k}$  – степень повышения давления в ДК при номинальном режиме;

$\bar{G}_k$  – относительный расход воздуха перед ГТД;

$A = \bar{G}_k (T_3/T_{03})^{0,5}$  – параметр расхода при расчете ГТД при переменном режиме.

Формулу (1) можно записать в виде

$$\pi_{\partial_k} = (\pi_{0\partial_k} - 1) (T_3 / T_{03})^S + 1, \quad (2)$$

т.е. регулирование характеристик ДК будет производиться от изменения начальной температуры газа в ГТД, что характеризует работу двигателя на частичных нагрузках.

Исследования характеристик ГТД (2СПН) с БТКУ при переменном режиме с ДК, работающем с изменяющейся характеристикой по закономерности (2) показали, что при  $S = 24$  теплотехнические характеристики ГТД (2СПН) с БТКУ достигают по тепловой мощности возможности ГТД (2СПН) с СТКУ (рис. 4). Таким образом, ГТД (2СПН) с БТКУ за счет изменения характеристики ДК может более гибко приспосабливаться к требованиям потребителей по виду и объемам поставляемой энергии.

### Заключение

1. Энергетические ГТД с промподогревом газа перед силовой турбиной и заблокированным турбокомпрессорным утилизатором на всех режимах имеют эффективный КПД более высокий, чем ГТД простого цикла.

2. ГТД с промподогревом газа перед силовой турбиной и свободным турбокомпрессорным утилизатором обладает более высокими теплотехническими характеристиками, так теплотехнический

КПД остается постоянным на всех режимах нагружения двигателя, а тепловая мощность в рабочем диапазоне электрической мощности.

3. В ГТД с турбиной перерасширения предоставляется возможность за счет изменения рабочего процесса в двигателе регулировать объемы поставляемой энергии.

### Литература

1. Матвеев В.Т., Литошенко В.Н. Результаты исследования характеристик циклов газотурбинных двигателей с промежуточным подогревом газа перед силовой турбиной // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.* – 2003. – Вып. 30. Двигатели и энергоустановки. – С. 54-56.
2. Матвеев В.Т., Слободянюк Л.И., Очеретяный В.А. Методика расчета энергетического ГТД с турбиной перерасширения на переменных режимах // *Изв. ВУЗов. Энергетика.* – 1999. – № 6. – С. 51-56.
3. Матвеев В.Т., Очеретяный В.А. Теплотехнические характеристики когенерационной газотурбинной установки сложного цикла с турбиной перерасширения // *Промышленная теплотехника, ИГТФ НАН Украины.* – «Логос». – 2006. – Т. 26, № 3. – С. 124-127.
4. Матвієнко В.Т. Теплові схеми енергетичних газотурбінних комплексів для забезпечення енергією технологічного обладнання морських бурових платформ // *Нафтова і газова промисловість.* – 2000. – № 3. – С. 21-23.

*Поступила в редакцию 14.05.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К.Ю. Федоровский, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.