

УДК 621.438

М.А. ТАРАСЕНКО, А.И. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

## ЧАСТИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ГТД РАЗНЫХ СХЕМ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛООБМЕННИКОМ И ТУК

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД), имеющий теплоутилизационный контур (ТУК) и промежуточный теплообменный аппарат между компрессорами. Компрессор считается состоящим из двух агрегатов. Компрессор перед промежуточным теплообменным аппаратом имеет отдельный привод. КПД установки поддерживается достаточно высоким в широком диапазоне мощностей регулировкой температуры воздуха на выходе из промежуточного теплообменного аппарата. Приведены результаты расчета для ГТД на базе одновальной схемы с использованием промежуточного теплообменного аппарата в режимах, как охладителя, так и подогревателя воздуха.

**Ключевые слова:** ГТД, ТУК, компрессор, теплообменный аппарат, кпд, расход, температура цикла.

### Введение

Особенностью газотурбинного двигателя (ГТД) с теплоутилизующим контуром (ТУК) является существенная зависимость температуры перед утилизационным котлом от режима работы и температуры наружного воздуха. Этот факт затрудняет осуществление утилизации и понижает КПД на частичных режимах работы.

Схема, предложенная в [1, 2] в большой степени свободна от указанных недостатков. Эта схема показана на рис. 1.

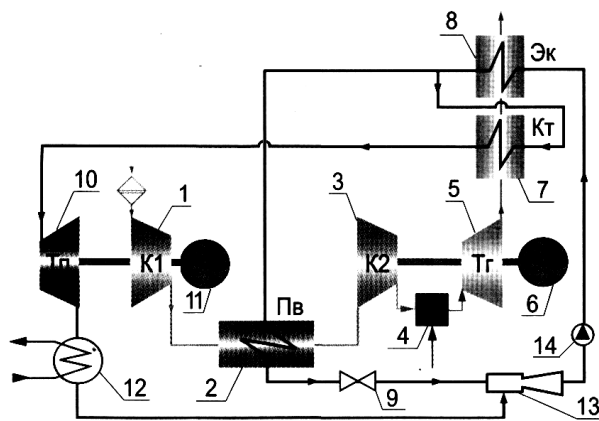


Рис. 1. Схема одновальной ГТД с ТУК и промежуточным подогревателем циклового воздуха:

- 1 – первый компрессор; 2 – подогреватель циклового воздуха; 3 – второй компрессор;
- 4 – камера сгорания; 5 – турбина газовая;
- 6 – генератор (внешняя нагрузка); 7 – котел;
- 8 – водоподогреватель (экономайзер);
- 9 – регулирующий кран; 10 – турбина паровая;
- 11 – генератор (внешняя нагрузка);
- 12 – конденсатор; 13 – струйный аппарат; 14 – насос

Работа ГТД рис. 1 подробно описана в [1, 2].

Рисунки в предлагаемой статье выполнены на основе рисунка из статьи [2]. Авторы признательны редакции журнала «Газотурбинные технологии» за удачное представление схемы ГТД.

Обнадеживающие результаты, полученные в [1, 2] позволяют провести сравнительные расчеты для других известных схем ГТД.

Используя в этих схемах ГТД промежуточный подогрев воздуха, и регулируя температуру воздуха на выходе из промежуточного теплообменного аппарата, можно менять мощность двигателя с незначительным понижением температуры цикла, а следовательно и КПД, и без срыва ТУК.

### 1. Формулирование проблемы

Рассматриваются схемы ГТД, изображенные на рис. 1 и рис. 2, в которых осуществляется подогрев циклового воздуха между компрессорами. Для подогрева воздуха используется низкопотенциальное тепло отходящих из утилизационного котла газов. Низкопотенциального тепла обычно много. Необходимо получить зависимость КПД двигателей рассматриваемых схем от относительной мощности при управлении температурой воздуха за промежуточным теплообменным аппаратом.

**Цель работы** – обосновать, путем сравнительных расчетов на ЭВМ, области применения рассматриваемых схем ГТД с промежуточным подогревателем циклового воздуха.

### Общие соображения

На рис. 1 показана схема газотурбинного двигателя с ТУК и промежуточным подогревателем

циклового воздуха на базе одновального ГТД. Эта схема рассмотрена в [1, 2] для турбогенератора.

На рис. 2 показана схема, в которой электрическая машина (рис. 1, позиция 11) отсутствует.

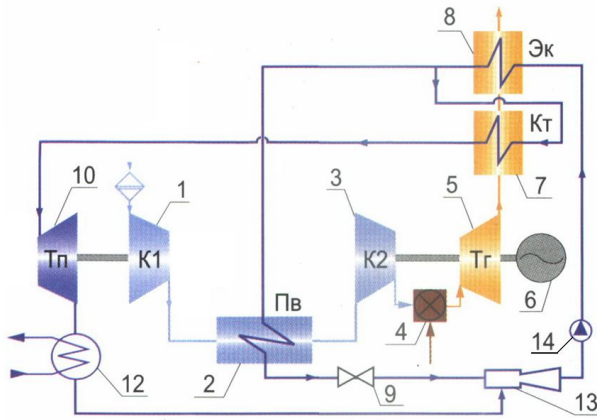


Рис. 2. Схема ГТД со свободной паровой турбиной ТУК для привода компрессора К1 и промежуточным подогревателем циклового воздуха

Для схемы рис. 2 скорость вращения компрессора перед теплообменным аппаратом переменна и определена балансом мощностей паровой турбины Тп и компрессора К1.

В процессе работы схем рис. 1 и рис. 2 используется следующий алгоритм работы:

1. На режимах работы близких к номинальному режиму мощность двигателя регулируют изменением температуры за подогревателем циклового воздуха. Температуру цикла при этом поддерживают на заданном уровне (как вариант – равной температуре на номинальном режиме). Таким способом понижают мощность до тех пор, пока температура за подогревателем циклового воздуха не станет равной 200 °С, если есть проблемы с устойчивой работой компрессора, то температуру на выходе из промежуточного теплообменного аппарата можно поддерживать на более низком уровне, например, на 150 °С с возможностью понижения.
2. Если температура за подогревателем циклового воздуха равна максимально допустимой, то ее поддерживают на заданном уровне, а температуру цикла понижают.

## 2. Решение проблемы

Необходимо определиться с возможностью использования схемы рис. 2 в качестве энергетической машины, и рассмотреть применение этой схемы, в качестве главного судового двигателя работающего по винтовой характеристике.

Сравнительный анализ схем рис. 1 и рис. 2 выполнен при следующих параметрах номинального режима:

- Температура за камерой сгорания ..... 1000 °С;
  - Суммарная степень повышения давления ..... 20;
  - КПД элементарной ступени ..... 0,9;
  - Температура за подогревателем (охладителем) циклового воздуха ..... 40 °С;
  - Степень восстановления полного давления в котле, подогревателе и камере сгорания ..... 0,95;
  - Отношение КПД парового цикла к КПД цикла Карно ..... 0,55.
- Результаты сравнительных расчетов показаны на графиках рис. 3.

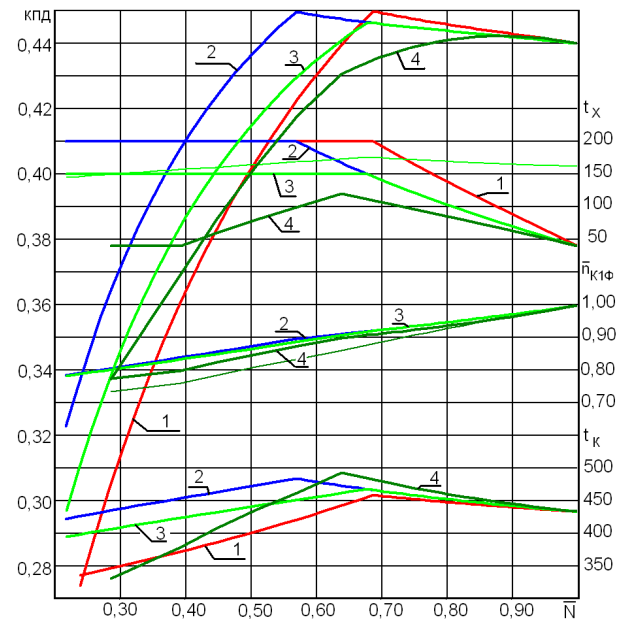


Рис. 3. Параметры ГТД схем рис. 1 и 2 при температуре наружного воздуха 15 °С: 1 – параметры схемы рис. 1; 2 – параметры схемы рис. 2 при 200 °С; 3 – параметры схемы рис. 2 при 150 °С; 4 – параметры схемы рис. 2 при работе по винтовой характеристике

На рис. 3 цифрой 1 указаны параметры ГТД схемы рис. 1. Так как в этой схеме скорость вращения компрессоров постоянна, то на графике она не показана. Цифрой 2 на этом рисунке указаны параметры ГТД схемы рис. 2 при максимальной температуре за подогревателем воздуха 200 °С. Видно, что параметры схемы рис. 2 лучше по сравнению со схемой рис. 1, однако, требуется анализ работы компрессоров. Способ повышения устойчивости – уменьшить температуру воздуха за подогревателем (кривые 3). Этим способом авторы злоупотребляли с целью обеспечить работу ГТД рис. 2 по винтовой характеристике. Формально ГТД рис. 2 по винтовой характеристике работать может, но лучше использовать винт регулируемого шага (ВРШ).

Если не применять ВРШ, то реверс реализовать затруднительно.

На рис. 4 показаны характеристики компрессоров с линиями совместной работы.

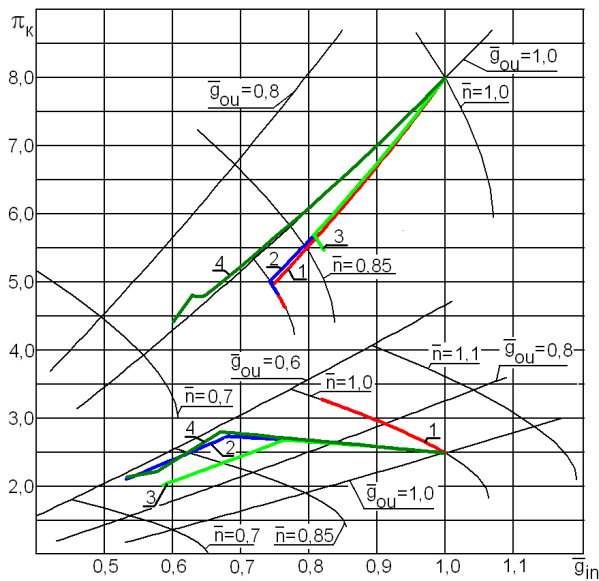


Рис. 4. Линии совместной работы ГТД схем рис. 1 и рис. 2 при температуре наружного воздуха 15 °С: 1 – параметры схемы рис. 1; 2 – параметры схемы рис. 2 при 200 °С; 3 – параметры схемы рис. 2 при 150 °С; 4 – параметры схемы рис. 2 при работе по винтовой характеристике

Из рис. 4 видно, что применение схемы рис. 2 не ухудшило состояние компрессоров. Следовательно, схема рис. 2 предпочтительнее. Надо сказать, что устойчивость работы компрессора низкого давления вызывает опасение. Поэтому компрессор низкого давления должен быть переразмерен. Его рабочая номинальная точка должна быть смещена по изодроме вниз.

Следует подчеркнуть, что в случае ограниченный по температуре за промежуточным теплообменным аппаратом (кривые 3 на графиках рис. 1 и рис. 2) параметры ГТД схемы рис. 2 такие, как и у схемы рис. 1 без ограничений, но запас устойчивости компрессора низкого давления выше.

Важно, чтобы при изменении температуры наружного воздуха компрессор низкого давления не терял устойчивость. С целью анализа состояния ГТД при изменении температуры на входе необходимо провести сравнительные расчеты параметров схемы рис. 2 для температур воздуха на входе в ГТД равных +45 °С, +15 °С и –30 °С. Параметры номинального режима те же, что при расчетах рис. 3 и рис. 4. На рис. 5 приведены параметры ГТД схемы рис. 2 практически во всем диапазоне температур воздуха на входе в двигатель.

Расчеты выполнены при условии, что максимальная температура за промежуточным теплообменным аппаратом равна 150 °С.

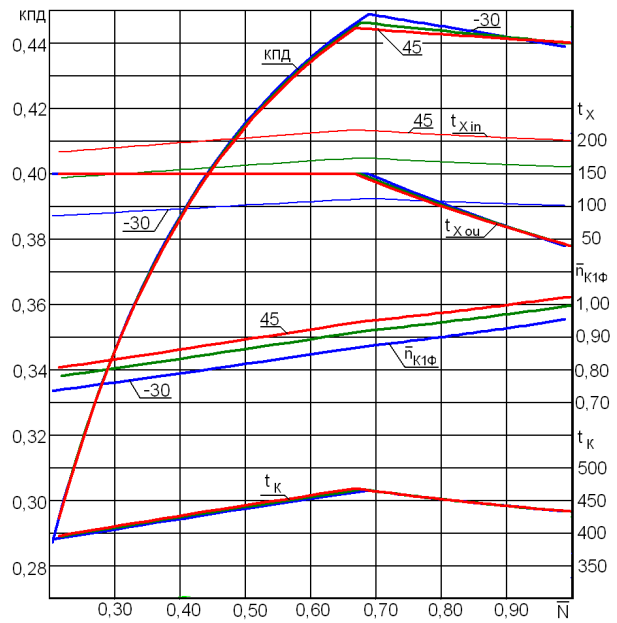


Рис. 5. Параметры ГТД схемы рис. 2 при температурах наружного воздуха +45 °С, +15 °С и –30 °С

На рис. 5  $t_{x\ ou}$  и  $t_{x\ in}$  – температуры на входе и выходе промежуточного теплообменного аппарата;

$n_{к1\phi}$  – фактическая скорость вращения компрессора 1;

$t_{к}$  – температура на входе в котел.

На рис. 6 показаны линии совместной работы.

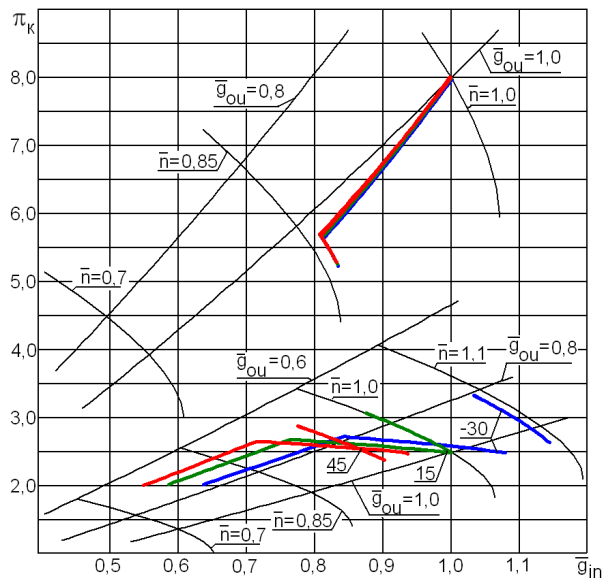


Рис. 6. Линии совместной работы ГТД схемы рис. 2 при температурах наружного воздуха +45 °С, +15 °С и –30 °С

На рис. 6 показаны линии совместной работы компрессоров для схем рис. 1 и 2. Применение схе-

мы рис. 2 не ухудшило положение компрессоров с точки зрения устойчивой работы.

### Заклучение

Промежуточный подогрев (охлаждение) циклового воздуха в ГТД с ТУК можно рассматривать как средство для обеспечения утилизации на частичных режимах в широком диапазоне температур наружного воздуха.

Показана целесообразность применения более простой схемы рис. 2.

Можно отметить, что для переоборудования стандартного ГТД до схемы рис. 2 не требуется растыковка двигателя и организация каких-либо механических связей с ним. ТУК организовывается стандартным образом, а паровая турбина, дополнительный компрессор и теплообменный аппарат состыкуются с входным устройством ГТД. При наличии вспомогательного котла можно организовать запуск двигателя без электростартеров, используя паровую турбину.

Применение промежуточного подогрева (охлаждения) циклового воздуха делает параметры ГТД стабильными. Мощность и КПД двигателя мало зависят от температуры наружного воздуха.

Рациональное использование вторичных тепловых ресурсов двигателя, путем промежуточного подогрева циклового воздуха в ГТД с ТУК, позволяет, по сравнению со стандартной схемой, повысить на частичных режимах КПД двигателя на 10 % или до 5 % абсолютных при уровнях КПД порядка 44 %.

### Литература

1. Тарасенко, М.А. Рациональное использование вторичных тепловых ресурсов в ГТД с ТУК на частичных режимах [Текст] / М.А. Тарасенко, А.И. Тарасенко // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 119–122.

2. Тарасенко, М.А. Рациональное использование низкопотенциальных тепловых ресурсов в ГТД с ТУК на частичных режимах [Текст] / М.А. Тарасенко, А.И. Тарасенко // Газотурбинные технологии. – 2011. – № 10 (101). – С. 42–44.

Поступила в редакцию 25.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

### ЧАСТКОВІ РЕЖИМИ ГТД РІЗНИХ СХЕМ С ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОБМІННИКОМ І ТУК

*М.О. Тарасенко, О.І. Тарасенко*

Розглядається газотурбінний двигун (ГТД), який має теплоутилізуючий контур (ТУК) та теплообмінний апарат проміж компресорами. Компресор вважається побудованим з двох агрегатів. Компресор до теплообмінного апарату має окремий привод від парової турбіни. Змінюючи температуру повітря, що виходить з теплообмінного апарату проміж компресорами можливо підтримувати ККД на досить високому рівні у широкому діапазоні потужностей. Наведено результати розрахунків для ГТД на базі одновальної схеми з використанням теплообмінного апарату проміж компресорами в якості підігрівача повітря.

**Ключові слова:** ГТД, ТУК, компресор, теплообмінний апарат, ККД, витрата, температура циклу.

### PARTIAL REGIMES OF GAS-TURBINE ENGINE WITH DIFFERENT SCHEMES WITH INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER AND HRO

*M.A. Tarasenko, A.I. Tarasenko*

Gas-turbine engine (GTE) with a heat-recovering outline (HRO) and intermediate heat exchanger in the compressor is reviewed. Compressor is consisting with two units. That part of compressor that is set before heat exchanger could has a dedicated drive. Changing temperature on heat exchanger output efficiency can be set and kept high enough in the wide range of power. The calculating results for GTE, based on single-shafted scheme with usage of intermediate heat exchanger as air heater, are given.

**Key words:** GTE, HRO, compressor, heat exchanger, efficiency, consumption, temperature of cycle.

**Тарасенко Марія Александровна** – инженер, ст. лаборант кафедри механіки і конструювання машин Національного університета кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: tai777@ukrpost.net.

**Тарасенко Александр Иванович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри механіки і конструювання машин Національного університета кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: tai777@ukrpost.net.