

ГИБКИЕ КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКЕ СЛОЖНОГО ЦИКЛА С ТУРБИНОЙ ПЕРЕРАСШИРЕНИЯ

Подано напрямом застосування гнучких когенераційних технологій, зокрема, у газотурбінній установці складного циклу з турбіною перерозширення, що дозволяє одержати регульовані і більш високі теплотехнічні характеристики при змінних режимах роботи енергетичної установки.

Представлено направление применения гибких когенерационных технологий, в частности, в газотурбинной установке сложного цикла с турбиной перерасширения, позволяющее получить регулируемые и более высокие теплотехнические характеристики при переменных режимах работы энергетической установки.

The direction of application flexible cogenerative technologies, in particular, in gas-turbine plant of the complicated cycle with the turbine of the overexpansion, allowing to receive adjustable and higher heat technical performances at variable modes of power plant operations is submitted.

G – массовый расход;

Q – удельная теплота;

T – температура;

π – степень повышения давления в компрессоре;

η – КПД турбомашин;

σ – степень регенерации теплоты.

Индексы:

в – воздух;

во – воздух на охлаждение;

дк – дожимающий компрессор;

е – эффективный;

к – компрессор;

тт – теплотехнический;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТУ – газотурбинная установка;

ДК – дожимающий компрессор;

ПП – промежуточный подогрев;

ТП – турбина перерасширения;

ТКУ – турбокомпрессорный утилизатор;

БТКУ – блокированный турбокомпрессорный утилизатор;

СТКУ – свободный турбокомпрессорный утилизатор;

Р – регенератор.

Введение

Применение когенерационных технологий для обеспечения энергией обособленных объектов промышленности, транспорта и коммунального хозяйства возможно при децентрализации генерирующих мощностей. При этом тепловая и конструктивная схема когенерационной установки должна быть приспособлена к поставке переменного объема энергии (электрической и тепловой) для разных потребителей.

Так как когенерационные энергоустановки, обеспечивающие энергией обособленные объекты, работают при переменных режимах не только в пределах сезона, но и в течение суток, выбор

оптимальной схемы установки, а также и двигателя для работы ее на частичных нагрузках является важным конструктивным и эксплуатационным фактором.

Для достижения гибкости в объемах поставки энергии и высокой тепловой эффективности энергетической газотурбинной установки можно применить не только различные тепловые и конструктивные схемы, но и управление рабочими процессами в циклах газотурбинных двигателей.

Гибким когенерационным технологиям может удовлетворить ГТУ с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты, а также промежуточным подогревом газа перед силовой турбиной.

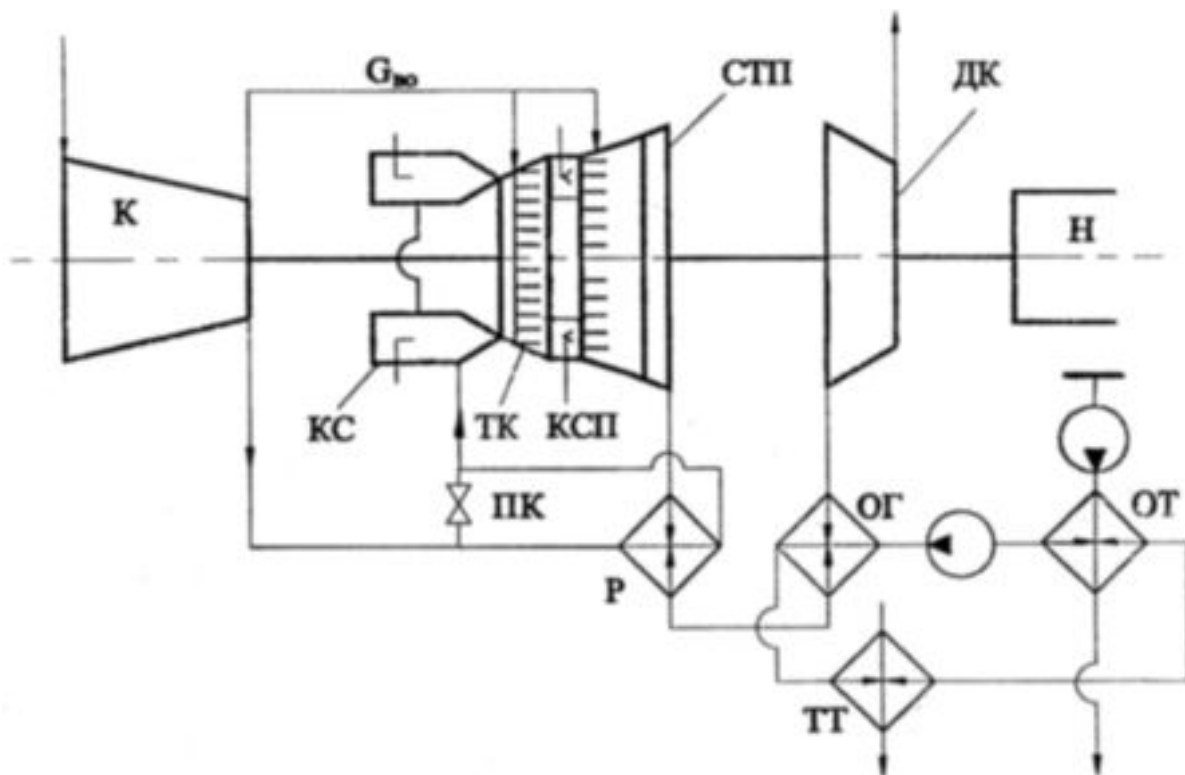


Рис. 1. Схема когенерационной ГТУ сложного цикла с турбиной перерасширения:
К – компрессор; **КС** – камера сгорания; **КСП** – камера сгорания промежуточная; **ТК** – турбина компрессора; **СТП** – силовая турбина перерасширения; **ДК** – дожимающий компрессор; **Н** – нагрузка; **ПК** – перепускной клапан; **Р** – регенератор; **ОГ** – охладитель газа; **ОТ** – охладитель теплоносителя; **ТТ** – теплофикационный теплообменник.

Такая ГТУ обладает высокими теплотехническими характеристиками, в том числе и эффективным КПД, а также удельной мощностью [1].

В работе [2] была показана возможность управления теплотехническими характеристиками ГТУ с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты за счет изменения напорных характеристик дожимающего компрессора, которые повлияли положительным образом на изменение процессов в цикле ГТУ.

На рис. 1 изображена схема ГТД с силовой турбиной перерасширения (СТП), промежуточным подогревом (ПП) газа перед ней и на одном валу с ней дожимающим компрессором (ДК). Между ними по потоку установлен регенератор (Р) и охладитель газа (ОГ). Турбина перерасширения с ДК и охладителем газа образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). ОГ в когенерационной установке выполняет роль теплогенератора в системе теплофикации.

Методика исследования ГТД сложного цикла при переменном режиме

Расчет характеристик ГТД сложного цикла с турбиной перерасширения производился по методике предложенной в работе [3] с учетом особенностей для схемы с промежуточным подогревом газа и регенерацией теплоты.

Методика позволяет определить характеристики газотурбинного ГТД с учетом охлаждения элементов двигателя цикловым воздухом, промежуточного подогрева газа перед силовой турбиной с различными законами регулирования температуры газа в основной камере сгорания и камере промежуточного подогрева газа.

При исследовании характеристик тепловых схем ГТД сложного цикла с турбиной перерасширения были рассмотрены две конструктивные схемы. Схема с заблокированным ТКУ, в которой турбина перерасширения заблокирована с силовой

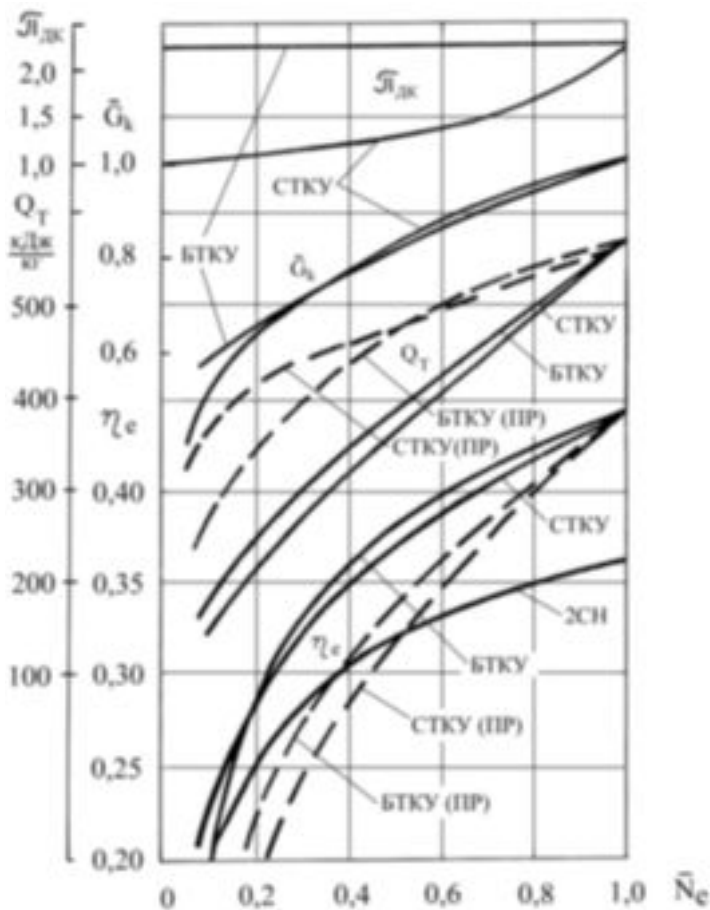


Рис. 2. Характеристики ГТД сложного цикла с турбиной перерасширения на частичных нагрузках при $T_{03} = 1473 \text{ К}$, $\pi_{ок} = 8$, $\pi_{одк} = 2,25$ и $\sigma = 0,85$ (нагрузка генераторная):

БТКУ(ПП) – схема ГТД с ПП, БТКУ и Р с перепуском воздуха мимо регенератора;
СТКУ(ПП) – схема ГТД с ПП, СТКУ и Р с перепуском воздуха мимо регенератора.

турбиной (рис. 1). Схема со свободным ТКУ, в которой ТКУ механически не связан с силовой турбиной. В схеме ГТД со СТКУ обороты ДК с падением мощности уменьшаются, соответственно, уменьшается степень повышения давления в ДК.

Исследования характеристик ГТД сложного цикла проводились при равенстве температур газа перед турбиной турбокомпрессора и силовой турбиной и пропорциональном их изменении при переменном режиме.

Анализ характеристик когенерационной ГТУ сложного цикла с ТП производился при различных начальных температурах газа T_3 , оптималь-

ных степенях повышения давления в компрессоре π_k , дожимающем компрессоре $\pi_{дк}$ и других исходных данных [1]. Величина степени регенерации принималась от 0,75 до 0,90.

Результаты исследований характеристик конструктивных схем ГТУ сложного цикла

Исследования ГТУ сложного цикла проводились в условиях, где свободная силовая турбина воспринимает генераторную нагрузку, при которой обороты силовой турбины постоянные. Что касается степени регенерации теплоты, то она с уменьшением нагрузки несколько увеличивается, причем незначительно, поэтому при расчетах ее принимают постоянной.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости характеристик когенерационных ГТУ сложного цикла с турбиной перерасширения от относительной эффективной (электрической) мощности N_e . На рис. 2 и 3 приводятся характеристики для схем ГТД с ПП, СТКУ и Р, ГТД с ПП, БТКУ и Р, а также для сравнения характеристики на частичных нагрузках ГТУ простого цикла (схема 2СН).

Общее положительное свойство ГТД с ПП, ТКУ и Р то, что на частичных нагрузках в широком диапазоне нагружения его эффективный КПД (η_e) более высокий, чем в ГТД простого цикла (схема 2СН). ГТД с ПП, БТКУ и Р на переменном режиме имеет эффективный КПД несколько выше, чем ГТД с ПП, СТКУ и Р. Это объясняется тем, что на всех режимах нагружения в БТКУ степень повышения давления в ДК ($\pi_{дк}$) постоянна (см. рис. 2).

На номинальной генераторной нагрузке теплотехнические (общие) КПД (η_t) для рассматриваемых схем примерно равны, однако на частичных нагрузках каждая конструктивная схема в зависимости от относительной мощности N_e имеет свои закономерности изменения теплотехнических характеристик (см. рис. 3).

Если в ГТД с ПП, БТКУ и Р и обычной ГТУ (схема 2СН) с уменьшением мощности двигателя относительная теплофикационная мощность $N_{тт}$ падает, примерно, в такой же степени как и N_e , то в схеме ГТД с ПП, СТКУ и Р $N_{тт}$ уменьшается в меньшей степени и при значениях $N_e = 0,7...0,5$ составляет $N_{тт} = 0,9...0,8$. Это

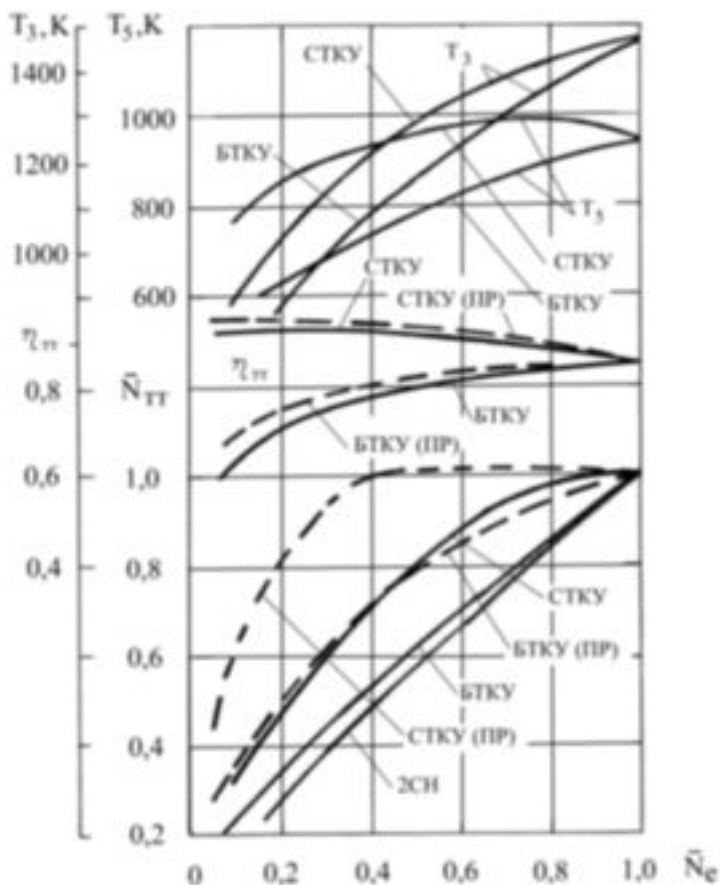


Рис. 3. Теплотехнические характеристики ГТУ сложного цикла с ТКУ на частичных нагрузках при $T_{03} = 1473 \text{ К}$, $\pi_{ок} = 8$, $\pi_{одк} = 2,25$ и $\sigma = 0,85$ (нагрузка генераторная):

БТКУ(ПР) – схема ГТД с ПП, БТКУ и Р с перепуском воздуха мимо регенератора;
СТКУ(ПР) – схема ГТД с ПП, СТКУ и Р с перепуском воздуха мимо регенератора

объясняется тем, что температура газа за турбиной перерасширения T_5 в ГТД со СТКУ на основных режимах изменяется мало, даже несколько растет на основных режимах работы установки. Для сравнения, на рис. 3 показано, что в ГТД простого цикла (схема 2СН) при $N_e = 0,7...0,5$ теплофикационная мощность $\bar{N}_{тт}$ принимает значения $0,75...0,55$.

Теплотехнический КПД в ГТД с ПП, БТКУ и Р на основных режимах работы $\bar{N}_e = 1,0...0,5$ остается достаточно высоким ($\eta_{тт} = 0,85...0,8$), в ГТД с ПП, СТКУ и Р даже растет до значения $0,9$, что обеспечивает высокий уровень использования энергии топлива на всех режимах работы ус-

тановки. Поэтому конструктивная схема ГТД с ПП, СТКУ и Р более предпочтительна при работе с переменными электрическими нагрузками и допустимым небольшим диапазоном изменения тепловой мощности установки при сохранении на рабочих режимах высокой энергоэффективности энергоустановки.

Управление теплотехническими характеристиками когенерационной ГТУ

ГТД обладают уникальной способностью изменять рабочий процесс за счет управления характеристиками компрессоров, турбин, камер сгорания и других элементов двигателя.

Изменение характеристик элементов ГТУ и через них процессов в циклах ГТД в определенных условиях может оказывать эффективное управляющее воздействие на изменение теплотехнических характеристик когенерационной ГТУ. Выбор управляемого элемента зависит от тепловой и конструктивной схемы ГТУ, а также от регламента поставки электрической и тепловой энергии.

При изменении электрической нагрузки тепловая мощность в когенерационной установке обычно должна быть более постоянной, чем в ГТД простого цикла с котлом-утилизатором. Лучше к такому требованию приспособлен ГТД с ПП, СТКУ и Р, в котором изменение характеристики ГТУ при переменном режиме можно осуществить посредством перепуска циклового воздуха мимо регенератора. Такой способ позволяет перераспределить тепловой поток за турбиной перерасширения между регенератором и охладителем газа, выполняющим роль котла-утилизатора (см. рис. 1).

Относительный расход воздуха $\bar{G}_{в,р}$ через регенератор определяется по формуле:

$$\bar{G}_{в,р} = (1 - \bar{G}_{во}) \bar{G}_к^{(n+1)}, \quad (1)$$

где $\bar{G}_к$ – относительный расход воздуха через компрессор двигателя;

$\bar{G}_{во}$ – относительный расход воздуха, отбираемый на охлаждение турбин.

При $n = 0$ в формуле (1) перепуск воздуха мимо регенератора отсутствует. Для увеличения

тепловой мощности ГТУ на частичной нагрузке через клапан КП (см. рис.1) производится перепуск части воздуха мимо регенератора.

Расчеты показали, что таким способом можно обеспечить постоянную $\bar{N}_{\text{тг}}$ на режимах $\bar{N}_e=1,0\dots0,4$, при этом в формуле (1) $n=2$. На рис. 3 эта зависимость обозначена – СТКУ(ПР).

Хотя удельная теплота $Q_{\text{т}}$, необходимая для подогрева воздуха в основной камере сгорания, увеличивается (см. рис. 2), общая энергоэффективность ГТУ остается без изменения на высоком уровне ($\eta_{\text{тг}}=0,9$). Перекрывая перепуск воздуха в ГТД с ПП, СТКУ и Р, на режиме $\bar{N}_e=0,4$ тепловую мощность можем уменьшить до $\bar{N}_{\text{тг}}=0,7$.

При обеспечении электрической энергией некоторых промышленных объектов требуется более лучшая приемистость ГТД и повышенный эффективный КПД на частичных нагрузках, что обеспечивает ГТД с ПП, БТКУ и Р. Однако тепловая мощность при переменном режиме в ГТУ (БТКУ) уменьшается почти так же, как и в когенерационном ГТД простого цикла (схема 2СН). Применяв перепуск воздуха мимо регенератора (в формуле (1) $n=2$), увеличим тепловую мощность и выйдем на теплотехнические характеристики схемы ГТУ (СТКУ). В ГТД с ПП, БТКУ и Р, изменив конструктивную схему посредством блокирования силовой турбины с турбиной компрессора, уменьшив степень повышения давления в ДК способом, предложенным в работе [2], и перепустив часть воздуха мимо регенератора, получим теплотехнические характеристики, свойственные ГТД с ПП, СТКУ и Р, обозначенные на рис. 2 и 3 – СТКУ(ПР).

Таким образом, сочетание определенной конструктивной схемы с управлением характеристиками элементов ГТД позволяет в широком диа-

пазоне изменять тепловую мощность ГТУ при переменном режиме.

Выводы

1. Совершенствование тепловых и конструктивных схем, изменение рабочего процесса двигателя позволяют создать энергоустановки, реализующие гибкие когенерационные технологии.
2. Газотурбинные двигатели по конструктивному исполнению элементов двигателя достаточно приспособлены к изменению рабочего процесса на переменных режимах.
3. Энергетические ГТУ сложного цикла с турбиной перерасширения на всех режимах работы обладают регулируемыми и более высокими теплотехническими характеристиками, чем в когенерационной ГТУ простого цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Матвеев В.Т., Очеретяный В.А.* Теплотехнические характеристики когенерационной газотурбинной установки сложного цикла с турбиной перерасширения // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 3. – С. 50–53.
2. *Матвеев В.Т.* Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков. – 2001. – Вып. 23. – С. 95–98.
3. *Матвеев В.Т., Слободянюк Л.И., Очеретяный В.А.* Методика расчета энергетического ГТД с турбиной перерасширения на переменных режимах // Энергетика (Изв. высших учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 51–56.