

Необходимо отметить, что удельная мощность $n_{уд}$ ГТД с СТП и Р при оптимальных значениях π_k в 1,5...1,75 раза больше, чем в ГТД с Р, что положительно влияет на массогабаритные характеристики ГТД, включающие в себя теплообменные аппараты.

На рисунке 1, б 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 (котла утилизатора), теплотехнический КПД ($\eta_{тт}$) в которой достигает значений 75...85 %.

2. Работа когенерационного ГТД с СТП и Р теплоты на переменном режиме. Главный двигатель в СПК является всережимным, поэтому желательно обеспечить высокую энергетическую эффективность его на переменных режимах работы, а также гибкую стабильную поставку тепловой энергии для подогрева нефти в танках при изменении скорости хода судна.

На рисунке 1, а приведена схема когенерационного ГТД с блокированным ТКУ (БТКУ) и регенерацией теплоты, где силовая турбина с турбиной перерасширения механически связана с ТКУ. Возможно применение со свободным ГТД ТКУ (СТКУ) и регенерацией теплоты (рисунок 1, б), где силовая турбина механически не связана с ТКУ.

Расчеты характеристик когенерационных ГТД с СТКУ и БТКУ и регенерацией теплоты проводились при оптимальных степенях повышения давления в двигателе и в дожимающем компрессоре для схемы с регенерацией теплоты. В схемах ГТД с БТКУ и Р вал силового турбокомпрессорного агрегата воспринимает винтовую нагрузку.

На рисунках 2 и 3 показаны зависимости характеристик ГТД с ТКУ и Р (схемы 1СН/Р + СТКУ и 1СН/Р + БТКУ) от относительной эффективной мощности $\bar{N}_e$.

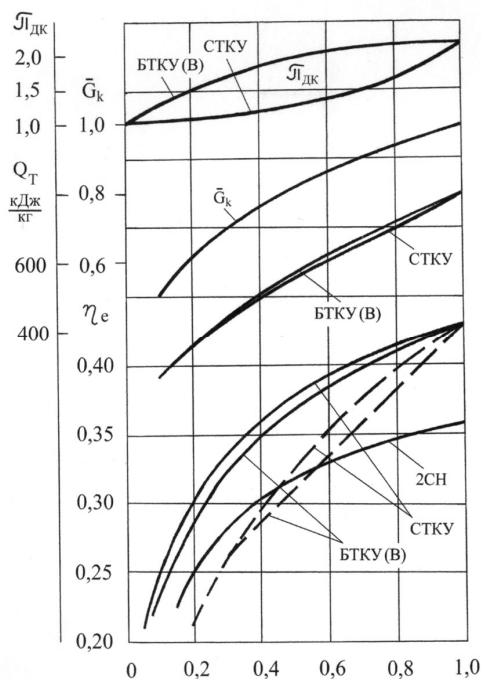


Рисунок 2 – Характеристики цикла ГТД с ТКУ и Р на частичных нагрузках при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 7$ и $\pi_{лк} = 2,25$ нагрузка (винтовая): СТКУ – схема 1СН/Р со свободным ТКУ; БТКУ – схема 1СН/Р с блокированным ТКУ

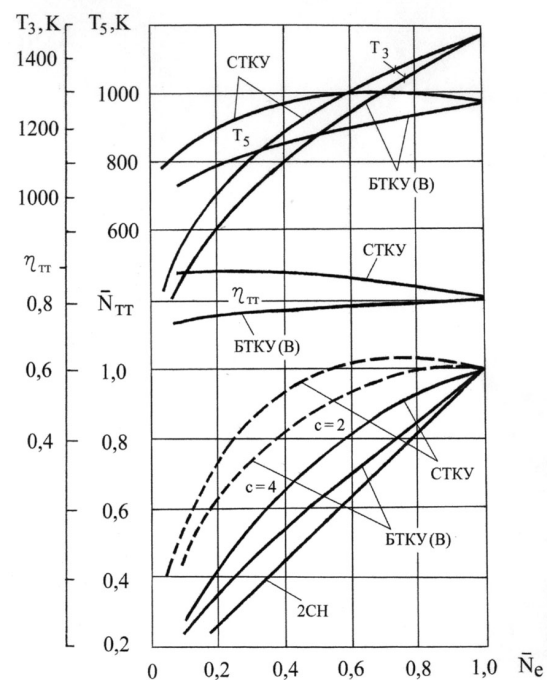


Рисунок 3 – Теплотехнические характеристики ГТД с ТКУ и Р на частичных нагрузках при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 7$ и $\pi_{лк} = 2,25$ (нагрузка винтовая): СТКУ – схема 1СН/Р со свободным ТКУ; БТКУ – схема 1СН/Р с блокированным ТКУ

Для сравнения приведены характеристики на частичных нагрузках обычной схемы 2СН.

При всех значениях относительной мощности $\bar{N}_e$ эффективный КПД ГТД с ТКУ и Р существенно выше, чем в ГТД простого цикла (схема 2СН). Здесь наблюдается суммарный эффект повышения эффективного КПД за счет регенерации теплоты и применения турбины перерасширения.

В ГТД со СТКУ и Р эффективный КПД несколько выше, чем в ГТД с БТКУ и Р. На переменном режиме необходимо отметить высокий теплотехнический (общий) КПД ГТД со СТКУ и Р, который с уменьшением мощности ГТД даже увеличивается.

При частичном нагружении в ГТД с БТКУ и Р тепловая мощность установки уменьшается практически пропорционально $\bar{N}_e$, также как в ГТД простого цикла (схема 2СН). Более стабильно генерируется тепловая энергия в ГТД со СТКУ и Р, так при относительной мощности $\bar{N}_e = 0,5$ тепловая мощность составляет $\bar{N}_{тг} = 0,70$.

3. Управление потоками энергии в ГТД с ТКУ и Р теплоты. Гибким когенерационным технологиям может удовлетворить ГТД с ТКУ и Р теплоты, теплотехнические характеристики которого при переменном режиме зависят от конструктивной схемы ГТД.

Изменять тепловую мощность когенерационного ГТД с ТКУ и Р можно посредством перепуска циклового воздуха мимо регенератора. Такой способ позволяет перераспределить тепловой поток за турбиной перерасширения между регенератором и охладителем газа – теплогенератором (рисунки 2 и 3).

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

$$\bar{G}_{вр} = (1 - \bar{G}_{во}) \bar{G}_к^C \quad (1)$$

где $\bar{G}_к$ – относительный расход воздуха через компрессор двигателя; $\bar{G}_{во}$ – относительный расход воздуха, отбираемый на охлаждение турбин.

При $C=0$ в формуле (1) перепуск воздуха мимо регенератора отсутствует. Для увеличения тепловой мощности ГТУ на частичной нагрузке через клапан КП (рисунок 4, а,б) производится перепуск части воздуха мимо регенератора.

При $C=2$ в формуле (1) посредством перепуска воздуха мимо регенератора можно обеспечить постоянную тепловую мощность $\bar{N}_{тг}$ на режиме $\bar{N}_e = 1,0 \dots 0,5$ в ГТД со СТКУ и Р (верхняя штриховая линия на рис. 5). Перекрыв перепуск воздуха, двигатель возвращается к начальной характеристике ГТД со СТКУ и Р.

Применение предложенного метода изменения характеристик в ГТД с ТКУ и Р позволяет в широком диапазоне изменять тепловую мощность энергоустановки при переменном режиме.

4. Условия работы ДК на частичных нагрузках ГТД с ТКУ и Р теплоты. Важным условием эксплуатации ГТД в СПК является обеспечение надежной и эффективной работы его элементов во всем диапазоне нагрузок. Как известно компрессоры имеют строго определенную область устойчивых режимов, что вызывает необходимость исследования их работы в составе когенерационной ГТУ [2].

На рисунке 4 изображена универсальная характеристика компрессора-прототипа, который возможно использовать в данной установке в качестве ДК. Линия рабочего режима ДК в ГТД с СТКУ (линия 1) на всех режимах его работы находится в устойчивой зоне. Судовая энергетическая установка большую часть эксплуатационного времени работает в пределах относительных нагрузок $\bar{N}_e = 0,8 \dots 1,0$, при этом КПД ДК составляет $\eta_{дк} = 0,87$, однако это значение КПД не является максимальным для выбранного компрессора. В случае перемещения номинальной рабочей точки в значение относительного расхода $\bar{G}_{дк} = 0,95$ КПД ДК возрастает во всем диапазоне нагрузок.

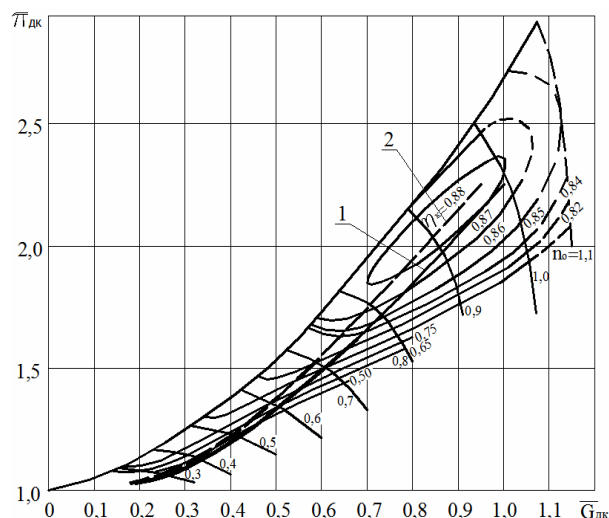


Рисунок 4 – Линии рабочих режимов дожимающего компрессора ГТД с СТКУ и Р теплоты

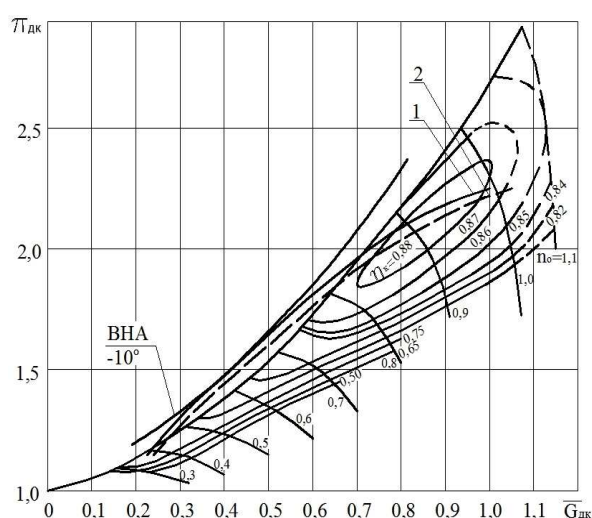


Рисунок 5 – Линии рабочих режимов дожимающего компрессора ГТД с БТКУ и Р теплоты

Линия рабочего режима ДК в ГТД с БТКУ и Р (рисунок 5, линия 1) в пределах значений относительного расхода $\bar{G}_{\text{дк}}=0,8\ldots 1,0$ лежит в области максимального КПД ($\eta_{\text{дк}}=0,88$), однако при $\bar{G}_{\text{дк}}=0,72$ компрессор начинает работать в неустойчивом режиме, что недопустимо. В данном случае предпочтительным является перенос номинальной рабочей точки в значение относительного расхода $\bar{G}_{\text{дк}}=1,05$, что позволяет приблизить характеристику к зоне устойчивых режимов работы (линия 2), при этом помпаж начинается при значении относительного расхода $\bar{G}_{\text{дк}}=0,65$.

В компрессорах с небольшими степенями повышения давления, а следовательно с небольшим числом ступеней, помпаж чаще всего возникает в первых ступенях. В таких компрессорах наиболее рационально применение входного направляющего аппарата (ВНА). Изменение положения лопаток под ВНА позволяет задать необходимый угол входа потока на рабочие лопатки компрессора. Испытания натурных образцов компрессоров показали, что при повороте лопаток ВНА на угол 10° смещается вверх граничная линия зоны помпажа, позволяя достичь устойчивой работы ДК на частичных режимах работы.

Выводы

1. ГТД с использованием ТКУ и Р теплоты по сравнению с ГТД простого цикла имеют более высокий КПД (на 4...6%) и могут быть применены в газоперекачивающих агрегатах и судовом пропульсивном комплексе.
2. Совершенствование тепловых и конструктивных схем, изменение рабочего процесса ГТД позволяет создать когенерационные установки с управляемыми потоками энергии.
3. Использование входного направляющего аппарата с регулируемым углом установки лопаток позволило обеспечить устойчивую работу ДК в ГТД с БТКУ и Р на всех нагрузках.

Библиографический список

1. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Пром. теплотехника. — 1997. — Т. 19. — № 4–5. — С. 81–85.
2. Приводные ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты / В.Т. Матвеев, В.П. Трошин, А.А. Филоненко, О.С. Кучеренко // Газотурбинные технологии. — 2005. — Вып. № 6 (41). — С. 42–44.

Поступила в редакцию 20.10.2008 г.