

УДК 621.438

М. А. ТАРАСЕНКО А. И. ТАРАСЕНКО

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

РАБОТА КОМПРЕССОРА НА ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОДНОВАЛЬНОГО ГТД И ГТД СО СВОБОДНОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) со свободной силовой турбиной (с отдельным газогенератором) для электростанции. Рассматривается работа ГТД на частичных режимах при постоянной температуре наружного воздуха. Приведены результаты расчета для ГТД на базе одновальной и двухвальной схем газогенератора для различных температур и мощностей. Приведены зависимости параметров двигателя от режима (относительной мощности) для различных температур наружного воздуха. Проведены сравнительные расчеты для одновальной и многовальной схем. Предпринята попытка объяснить зависимости параметров ГТД от температуры наружного воздуха с помощью характеристики компрессора.

Ключевые слова: ГТД, газогенератор, компрессор, турбина, мощность, КПД, расход, температура, характеристика компрессора.

Введение

К эксплуатационным недостаткам газотурбинного двигателя относят снижение агрегатной мощности и экономичности (КПД) при повышении температуры наружного воздуха (температуры воздуха на входе в двигатель). Этот факт считается классикой (авторы не указывают конкретный источник ввиду широты упоминания). Что касается максимальной агрегатной мощности, то с фактом ее уменьшения с ростом температуры нужно считаться. Экономичность ГТД при изменении температуры наружного воздуха, по мнению авторов, необходимо рассмотреть подробно. В патенте [1] указано на целесообразность подогрева наружного воздуха на входе в ГТД при наличии тепло-утилизационного контура (ТУК). Этот вывод подтвержден в работах авторов [2, 3].

В работе [2, 3] исследовано влияние температуры на частичные режимы одновального ГТД для электростанции. В этих публикациях показано, что при работе с постоянной мощностью, а именно так работают практически все энергетические машины, КПД газотурбинного двигателя падает с уменьшением температуры. На основе этого факта был сделан вывод о целесообразности подогрева воздуха на входе в двигатель. Этот вывод противоречит общепринятым нормам. Даже в патенте [1] подчеркнуто, что положительное влияние охлаждения на входе в ГТД без ТУК – общеизвестный факт.

Учитывая полученные для одновального двига-

теля результаты, авторы сочли целесообразным провести аналогичные исследования для многовальных двигателей со свободной силовой турбиной и механически не связанного с ней газогенератора. Результаты этих исследований приведены в [5]. Результаты оказались неожиданными и противоречат устоявшимся правилам и выводам. Для пояснения полученных в этой работе результатов авторы рассмотрели работу компрессора для схем с отдельным газогенератором и простейшей однокаскадной (одновальной) схемой.

1. Формулирование проблемы

Требуется рассмотреть зависимость основных параметров двигателя от температуры наружного воздуха на входе в двигатель. Для сравнительного анализа двигателей необходимо разработать широкодиапазонную методику расчетов. Результаты расчетов представить на характеристике компрессора. Компрессора в сравниваемых двигателях должны быть одинаковые, что позволит наложить линии работы разных двигателей на одну и ту же характеристику.

Цель работы – провести сравнительный анализ влияния температуры наружного воздуха на частичные режимы газотурбинного двигателя с однокаскадным газогенератором и свободной силовой турбиной и простейшего однокаскадного двигателя, состоящего из одной турбины и одного компрессора. Компрессора и номинальные режимы в сравниваемых двигателях должны быть одинаковые, что

позволит наложить линии работы разных двигателей на одну и ту же характеристику и провести сравнительный анализ параметров рассматриваемых двигателей.

1.1. Общие соотношения

Рассматриваются газотурбинные двигатели, схемы которых показаны на рис. 1 и 2.

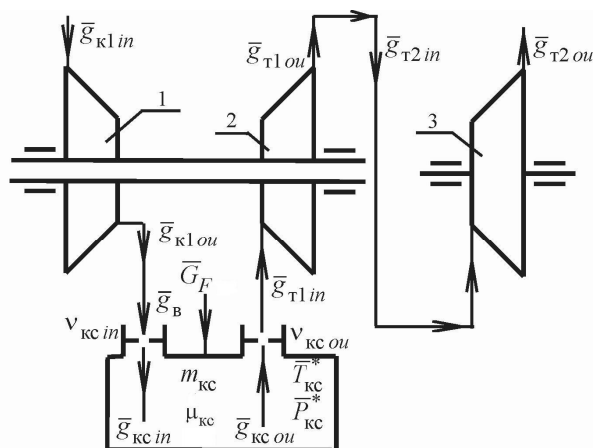


Рис. 1. Схема двигателя со свободной силовой турбиной и однокаскадным газогенератором

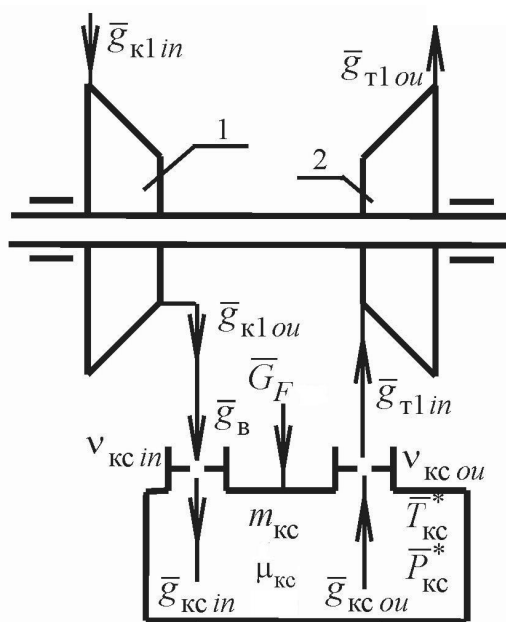


Рис. 2. Схема однокаскадного двигателя

На рис. 1 показана схема ГТД с однокаскадным газогенератором. Газогенератор состоит из компрессора 1, турбин 2, 3 и камеры сгорания. Турбина 3 – это свободная силовая турбина. Такая схема предпочтительна по критическим числам оборотов. Она не содержит длинных тонких валов. Газогене-

ратор можно сделать быстроходным. Недостаток – поворотные направляющие аппараты.

В качестве базовой схемы рассматривается известная однокаскадная схема на рис. 2. Обозначения на рис. 2. такие же, как на рис. 1.

Однокаскадный газотурбинный двигатель сравнительно простой и дешевый, но при работе на частичных режимах и запуске возникают проблемы с устойчивостью работы. Применение такого двигателя в стационарной энергетике вполне возможно.

Для корректности сравнения полагаем, что между компрессорами и турбинами нет потерь полного давления. Потери полного давления учитываются только на входе и выходе из камеры сгорания.

1.2. Методика расчета

Система уравнений и методика расчета приведены в [5]. Рассматривая массовый баланс в камере сгорания, запишем

$$\frac{\bar{g}_{kc in}}{\sqrt{T_{kc in}^*}} + \frac{k_f \bar{G}_F}{P_{kc}^*} = \frac{\bar{g}_{kc ou}}{\sqrt{T_{kc}^*}} (1 + k_f). \quad (1)$$

Мольный баланс даст следующее уравнение

$$\frac{\bar{g}_{kc in}}{\mu_a \sqrt{T_{kc in}^*}} + \Delta_L \frac{k_f \bar{G}_F}{P_{kc}^*} = \frac{\bar{g}_{kc ou}}{\mu_{kc} \sqrt{T_{kc}^*}} (1 + k_f). \quad (2)$$

Рассмотрев баланс энергии, получим следующее уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\bar{g}_{kc in}}{\sqrt{T_{kc in}^*}} \left[T_{kc}^* C_{pm}^{T_{kc}^*} - T_{kc in}^* C_{pm}^{T_{kc in}^*} \right] = \\ = \frac{k_f \bar{G}_F}{P_{kc}^*} (H_u - T_{kc}^* \cdot C_{pm}^{T_{kc}^*}). \end{aligned} \quad (3)$$

Обозначения в этих уравнениях ясны с рис. 1 и 2, а также подробно описаны в [5]. Там же описана методика расчетов. Следует отметить, что уравнение (1) не может быть рекомендовано для определения $\bar{G}_F$ из-за потери точности при вычитании. Для определения $\bar{G}_F$ подходит уравнение (3).

2. Результаты сравнительных расчетов ГТД разных схем

Зависимость КПД двигателя от температуры наружного воздуха, полученная в [5], показана на рис. 3. На рис. 3 приведены зависимости КПД однокаскадного двигателя и двигателя со свободной силовой турбиной (горизонтальные линии). Таким образом, КПД однокаскадного двигателя при работе с постоянной мощностью при уменьшении температуры наружного воздуха падает, а КПД двигателя со

свободной силовой турбиной при уменьшении температуры наружного воздуха не меняется. Этот результат необычный потому, что ожидалось повышение КПД и поэтому его постоянство и даже уменьшение требует пояснений.

Для трактовки результатов расчетов, показанных на рис. 3, достаточно рассмотреть характеристику компрессора.

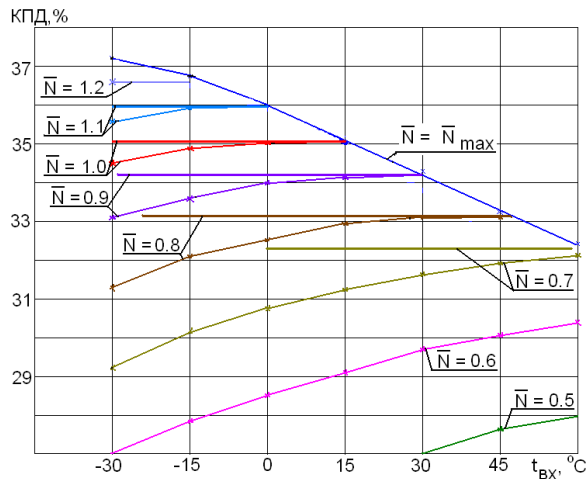


Рис. 3. Зависимость КПД газотурбинного двигателя от температуры наружного воздуха

На рис. 4 показаны характеристика компрессора с линиями совместной работы при изменении температуры от 30 °C до -30 °C. На рис. 4. литерой S показаны линии для ГТД со свободной силовой турбиной. Видно, что диапазон изменения параметров для случая свободной силовой турбины гораздо уже, чем для однокаскадного двигателя. Действительно, параметр расхода для двигателя с газогенератором меняется меньше, чем на одну десятую, в то время когда для однокаскадного двигателя это изменение в два раза больше. Степень повышения давления для однокаскадного двигателя меняется с 14 до 17, в то время как для случая свободного газогенератора это изменение от 15 до 15,5 на номинальной мощности и от 13,5 до 14 на режиме 0,85.

Таким образом, КПД однокаскадного двигателя при работе с постоянной мощностью при уменьшении температуры падает, а КПД двигателя со свободной силовой турбиной при уменьшении температуры не меняется (падает, но не столь значительно).

Выводы

Подогрев воздуха на входе в ГТД при температурах наружного воздуха ниже 0 °C полезен и для повышения КПД в случае однокаскадного двигателя и для нормальной работы систем очистки воздуха.

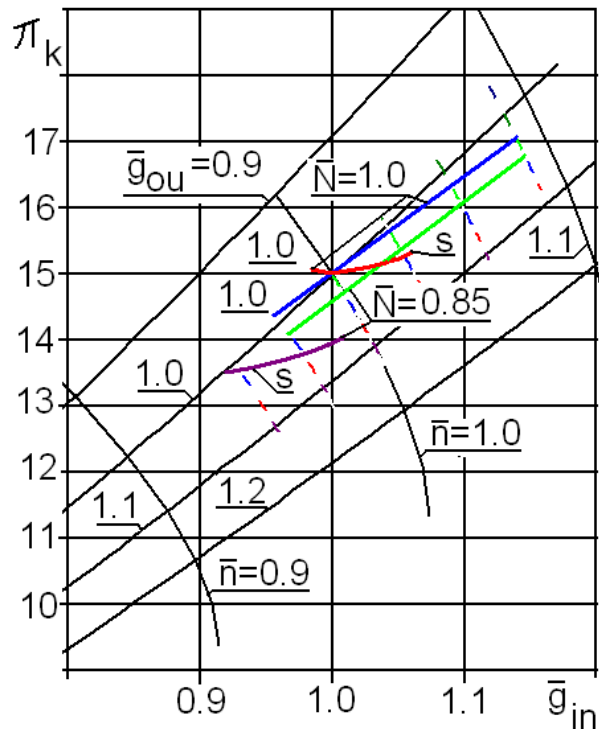


Рис. 4. Характеристика компрессора с линиями совместной работы

Если двигатель должен работать в условиях холодного климата, то он должен быть спроектирован на низкие температуры (например, на -15 °C). В этом случае его КПД будет выше.

Следует различать номинальную температуру наружного воздуха, на которую двигатель спроектирован и ту, которая есть фактически. Оптимальный режим – когда фактическая температура совпадает с номинальной.

Понижение температуры наружного воздуха не вызовет повышение КПД при работе с постоянной мощностью.

Мощность, потребляемая компрессором при понижении температуры наружного воздуха, возрастает вследствие увеличения расхода воздуха в однокаскадном генераторном двигателе на постоянной скорости вращения. В двигателе с отдельным газогенератором попытка компрессора увеличить мощность вызовет понижение скорости вращения.

Приведенная скорость вращения компрессора в двигателе со свободной силовой турбиной оказывается стабилизирована. Уменьшение замеренной скорости вращения при понижении температуры наружного воздуха компенсируется операцией приведения.

При понижении температуры наружного воздуха приведенный расход воздуха в компрессоре повышается. Это повышение значительно в однокаскадном двигателе и менее значительно в двига-

теле со свободной силовой турбиной. Следовательно, с понижением температуры КПД двигателя падает. Для двигателя со свободной силовой турбиной это падение не столь значительно.

Литература

1. Mangan, J. L. *US 3159487 Steam turbine-gas turbine power plant. [Text]* / J. L. Mangan, T. J. Hinkler. – 1963. – 400 p.

2. Тарасенко, М. А. Влияние температуры наружного воздуха на КПД одновального газотурбинного двигателя для электростанции [Текст] / М. А. Тарасенко, А. И. Тарасенко // Газотурбинные технологии, – 2012. – № 8 (109). – С. 28–31.

3. Тарасенко, М. А. Влияние температуры наружного воздуха на параметры частичных режимов ГТД для электростанции [Текст] / М. А. Тарасенко, А. И. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология, – 2013. – № 8 (105). – С. 73–77.

4. Тарасенко, А. И. Широкодиапазонная динамическая модель ГТД [Текст] / А. И. Тарасенко А. А Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 9 (96). – С. 243–247.

5. Тарасенко, М. А. Сравнительный анализ частичных режимов одновального и многовальных ГТД при изменении температуры наружного воздуха [Текст] / М. А. Тарасенко, А. И Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 9 (116). – С. 74–79.

Поступила в редакцию 27.04.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения, Николаев.

РОБОТА КОМПРЕСОРА НА ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ ОДНОВАЛЬНОГО ГТД ТА ГТД З ВІЛЬНОЮ СИЛОВОЮ ТУРБІНОЮ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯ

М. О. Тарасенко, О. І. Тарасенко

Розглядається газотурбінний двигун (ГТД) з вільною силовою турбіною (з окремим газогенератором) для електростанції. Розглядається робота ГТД на часткових режимах при постійній температурі зовнішнього повітря. Наведено результати розрахунків для ГТД на базі одновальної і двохвальної схеми для різних температур та потужностей. Наведено залежності параметрів двигуна від режиму (відносної потужності) для різних температур зовнішнього повітря. Наведено порівняльні розрахунки для одновальної та багатовальної схем. Здійснено спробу пояснити залежність параметрів ГТД від температури зовнішнього повітря за допомогою характеристики компресора.

Ключові слова: ГТД, газогенератор, компресор, турбіна, потужність, ККД, витрата, температура, характеристика компресора.

PARTIAL MODES OF OPERATION OF THE COMPRESSORS ON A SINGLE-SHAFT TURBINE ENGINE OR TURBINE ENGINE WITH A FREE POWER TURBINE WORKING WITH VARYING TEMPERATURES OF OUTSIDE AIR

M. A. Tarasenko, A. I. Tarasenko

We consider a gas turbine engine (GTE) with a free power turbine (with a separate gas generator) for the power plant. We consider the work of GTE on partial mode at a constant temperature of outside air. The results of calculations for a turbine engine based on the single-shaft and twin-shaft gas generator circuits for different temperatures and powers are shown. The dependences of the engine parameters on the mode (relative power) for different outside air temperatures are also shown. Comparative calculations for single-shaft and multi-shaft scheme are made. By using the compressors characteristics we made an attempt to explain the dependence of the parameters of the turbine engine on the outside air temperatures.

Key words: GTE gas generator, compressor, turbine, power, efficiency, flow, temperature, compressors characteristics.

Тарасенко Марія Александровна – інженер каф. механіки і конструювання машин Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: tai777@ukrpost.net.

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