
УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА

Ю.А. Антипов, И.А. Барский,
И.К. Шаталов, Д.В. Терехов

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Рассматриваются различные способы повышения мощности газотурбинных установок (ГТУ) при повышенных температурах наружного воздуха.

Ключевые слова: турбина, лопатка, частота вращения, мощность, температура, лопатка.

Из всех тепловых двигателей (дизелей, бензиновых, газовых, паротурбинных, газотурбинных) у ГТУ сильнее всего снижается мощность и экономичность при повышенных температурах воздуха T_n . Это объясняется тем, что полезная работа ГТУ L_e равна разности между работой турбины L_T и компрессора L_K , т.е. $L_e = L_T - L_K$, при этом L_e в несколько раз меньше, чем L_T и L_K . Поэтому небольшое увеличение L_K приводит к сильному снижению L_e .

Работа компрессора пропорциональна T_n . Обычно в качестве стандартной принята температура $T_n = 288$ К (15 °С). Увеличение этой температуры на 10% (на 28,8 К) увеличивает работу компрессора на 10%, а так как L_T остается неизменной, то L_e снижается на 20—25%. При этом несколько уменьшается расход воздуха G_B (из-за снижения степени повышения давления в компрессоре π_K). В результате мощность $N_B = G_B \cdot L_B$ уменьшается на 25—30%.

На рис. 1 приведены зависимости мощности ряда одновальных, двухвальных и трехвальных ГТУ от температуры окружающей среды. Для удобства сравнения разных ГТУ по оси ординат отложена относительная мощность $\overline{N_e} = \frac{N_e}{N_{e0}}$, где N_{e0} — мощность при температуре воздуха 15 °С.

У одновальных и двухвальных ГТУ при всех температурах выдерживалась постоянная частота вращения компрессора, а у трехвальных ГТУ — постоянная частота вращения компрессора высокого давления.

Для определения мощности при повышении температуры воздуха при условии постоянства температуры газа перед турбиной высокого давления (этому примерно соответствует условие $n_k = \text{const}$) можно предложить следующую полуэмпирическую формулу [1]:

$$N_e = N_{e0} \cdot [1 - a \cdot (T_n - 288)],$$

где $a = 0,009—0,001$ — для одновальных и двухвальных ГТУ и $a = 0,012—0,013$ — для трехвальных ГТУ.

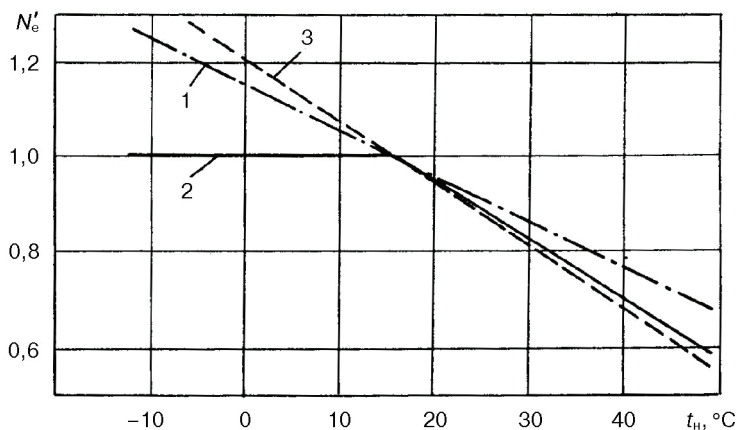


Рис. 1. Зависимость относительной мощности двухвалных и трехвалных ГТД от температуры воздуха при постоянной температуре газа:

- 1 — двухвалный ГТД: ГТ-700-4, ГТК-10 НЗЛ; TF-35 «Лайкоминг»;
- 2 — трехвалный ГТД ДГ-90 ПО «Машпроект»;
- 3 — трехвалный ГТД GT-35 компании АBB

Таким образом, на каждый градус повышения температуры воздуха выше 15 °С мощность одновалных и двухвалных ГТУ уменьшается на 0,9—1%, а трехвалных ГТУ — на 1,2—1,3%.

Причина более высокой чувствительности последних к росту T_n заключается в том, что в трехвалных ГТУ при высоких температурах воздуха сильно снижается частота вращения компрессора низкого давления. Это связано с тем, что увеличение T_n вызывает рост работы компрессора НД, а приводящая его турбина среднего давления располагает меньшим теплоперепадом, чем при $T_n = 288$ К. В результате при росте T_n у трехвалных ГТУ π_k падает сильнее, чем в двухвалных. А так как расход газа через турбины пропорционален π_k , то и мощность трехвалных ГТУ снижается сильнее, чем двухвалных.

Повышение N_e при $T_n > 288$ К можно достичь следующими способами:

- впрыском воды в компрессор;
- выбором расчетных параметров при $T_n = 293—303$ К;
- применением (вместо трехвалной) одно- и двухвалной схемы с регулируемым осевым компрессором, обладающим высокой величиной π_k ;
- применением соплового регулирования силовой турбины в двухвалных ГТУ.

Опыты показывают, что впрыск воды в компрессор заметно увеличивает мощность ГТУ при стандартной температуре (до 25%). Особенно эффективен впрыск при высокой температуре воздуха.

На рис. 2 приведены зависимости мощности, π_k и расхода воздуха G_B турбовинтового одновалного двигателя АИ-24 мощностью 1500 кВт от температуры воздуха при отношении расхода жидкости $G_{ж}$ к расходу воздуха $d = \frac{G_{ж}}{G_B} = 0,025$.

Видно, что при $t_n = 50$ °С выигрыш мощности от впрыска достигает 40%.

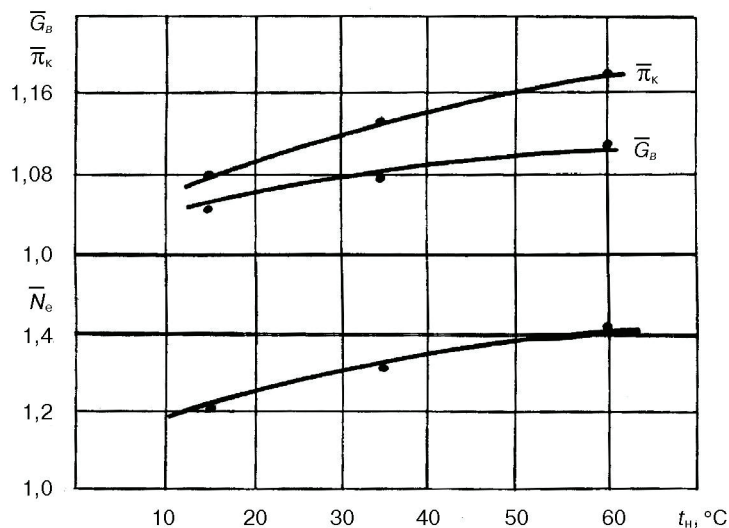


Рис. 2. Температурные характеристики ТВД АИ-24 при впрыске жидкости в компрессор при относительном впрыске $d = \frac{G_{ж}}{G_B} = 0,025$

Опыты показали, что впрыск жидкости более 2,5—3% от расхода воздуха нецелесообразен из-за снижения эффективности этого способа повышения мощности.

По результатам испытаний, проведенных в ЦИАМ, РУДН и других организациях, можно предложить следующую формулу для расчета эффективности впрыска:

$$\bar{N}_e = (1 + 10 \cdot d^{1,05}) \cdot \left(\frac{T_H}{288} \right)^{0,8},$$

где $N_e = \frac{N_{ed}}{N_e}$, N_e — мощность ГТУ без впрыска жидкости; N_{ed} — мощность с впрыском жидкости.

Несмотря на высокую эффективность впрыска, его длительное применение остается под вопросом из-за большого расхода дистиллированной воды и опасности коррозии и эрозии деталей проточной части ГТУ.

Выбор в качестве расчетной более высокой температуры воздуха приводит к тому, что расчетная величина π_k достигается не при $T_H = 288$ К, а при более высокой (на 20—30 °С) температуре. Это приводит к увеличению расхода воздуха и мощности при высокой температуре. Правда, при этом на 4—6% возрастает номинальная частота вращения компрессора. Заметим, что в США у наземных ГТУ в качестве номинальной принята температура, равная 80 и 90 °F (т.е. 26,6 и 32 °С).

Возврат от трехвальной к одно- и двухвальной схеме связан не только с лучшими температурными характеристиками двух последних. Недостаток трехваль-

ной схемы в сложности и дороговизне, а также в трудностях создания системы регулирования для установок, предназначенных для привода электрогенератора с частотой 50 Гц ($n = 3000 \text{ мин}^{-1}$). В этом случае можно применять одновальные ГТУ с осевым компрессором с регулируемыми лопатками статора. Благодаря этому можно повысить π_k с 6—7 до 10—12 и выше. В США уже с 1956 г. выпускается одновальный турбореактивный двигатель J-79 с $\pi_k = 12$ [2]. Для энергетических ГТУ применяется и более простое решение: на режимах пуска, холостого хода и выхода на расчетный режим $n_k = 3000 \text{ мин}^{-1}$ компрессор работает с перепуском воздуха в атмосферу. При подходе к расчетной частоте вращения перепуск закрывается. Это позволило в строящихся в настоящее время парогазовых установках мощностью до 150 МВт использовать одновальные ГТУ. Например, в ПГУ V-94-3 фирм Siemens-ЛМЗ применяются одновальные ГТУ с $\pi_k = 13—17$ [3].

Применение силовой турбины с регулируемым сопловым аппаратом в двухвальных ГТУ позволяет повышать мощность при повышенных температурах воздуха. Увеличивая угол выхода из соплового аппарата, повышают теплоперепад в компрессорной турбине и тем самым увеличивают π_k и G_b . При $t_n = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ за счет увеличения угла выхода потока из соплового аппарата на 4—5° и частоты вращения компрессора на 7% можно повысить мощность на 10% [4]. Такой метод увеличения мощности применен в двухвальных ГТУ фирмы «Дженерал электрик» мощностью 5000 кВт, применяемых на нефтепромыслах Маракайбо (Венесуэла).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) при увеличении температуры воздуха на 1 °С мощность одно и двухвальных ГТУ уменьшается на 0,9—1%, а трехвальных — на 1,2—1,3%;
- 2) кратковременное увеличение мощности на 20—40% при повышенных температурах воздуха возможно путем впрыска 2—3% воды в компрессор;
- 3) выбор номинального режима при температуре 35—40 °С может улучшить температурные характеристики ГТУ всех типов;
- 4) применение вместо трехвальных одно- и двухвальных ГТУ с регулируемыми лопатками компрессора и перепуском воздуха позволяет при достаточно высокой величине π_k улучшить температурные характеристики ГТУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шаталов И.К., Барский И.А. Регулировочные характеристики газотурбинных установок, схемы и определение основных параметров ПГУ. — М.: РУДН, 2003.
- [2] Холцевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. — М.: Машиностроение, 1970.
- [3] Трухний А.Д. Основы современной теплоэнергетики. — М.: МЭИ, 2005.
- [4] Барский И.А., Шаталов И.К. Расчет характеристик газотурбинных установок. — М.: РУДН, 1971.

IMPROVEMENT OF GAS TURBINE PERFORMANCE AT HIGH TEMPERATURES OF AMBIENT AIR

**Ju.A. Antipov, I.A. Barsky,
I.K. Shatalov, D.V. Terekhov**

Department of Heat Engineering and Thermal Engines
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Different ways of increasing gas turbine power at high temperatures of ambient air are analysed.

Key words: the turbine, frequency of rotation, capacity, temperature, the blade.