

МОЩНОСТЬ И ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ОДНОВАЛЬНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Ю.А. Антипов, И.А. Барский,
И.К. Шаталов

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

Получено уравнение (7), связывающее мощность одновальной ГТУ с частотой вращения, которая обратно пропорционально квадратному корню из мощности.

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

Синхронная частота вращения электрогенератора равна

$$n = \frac{60 \cdot f}{P},$$

где f — частота трехфазного тока; P — число пар полюсов генератора.

При $f = 50$ Гц и $P = 1$ частота вращения $n = 3000$ мин⁻¹. При $P = 2$, $n = 1500$ мин⁻¹.

Для того, чтобы энергетическая газотурбинная установка (ГТУ) напрямую приводила генератор, ее выходной вал должен вращаться с частотой 3000 мин⁻¹ или 1500 мин⁻¹ при генераторе с одной и двумя парами полюсов.

Рассмотрим условия, при которых можно получить требуемую частоту вращения одновальной ГТУ без применения редуктора. Осевая площадь на выходе из последней ступени турбины

$$F_2 = \frac{G_T}{\rho_2 \cdot C_{2a}}, \quad (1)$$

где G_T — расход газа; ρ_2 — плотность газа на выходе из последней ступени; C_{2a} — осевая скорость на выходе.

В современных ГТУ со степенью повышения давления в компрессоре $\pi_k = 15$ —30 и температурной газа перед турбиной $t_T = 1180$ —1350 °C ($T_T = 1453$ —1623 К) температура газа на выходе из турбины $t_2 = 500$ —600 °C ($T_2 = 823$ —873 К) [1]. Осевая скорость в стационарных ГТУ равна $C_{2a} = 130$ —150 м/с, что соответствует приведенной скорости $\lambda_2 = \frac{C_{2a}}{18,3\sqrt{T_2}}$, равной 0,25—0,28. При давлении га-

за на выходе $P_2 = 0,1013$ МПа, $T_2 = 550$ К получим, что $\rho_2 = \frac{P_2}{288 \cdot T_2} = 0,414$ кг/м³.

Приняв, что расход газа равен расходу воздуха т.е. $G_b = G_T$, из (1) получим:

$$F_2 = \frac{G_b}{0,414 \cdot 140} = \frac{G_b}{5800} M^2 = \pi \cdot D \cdot l.$$

Средний диаметр D последней ступени турбины

$$D = \sqrt{\frac{F_2}{3,14(l/D)}}. \quad (2)$$

Отношение длины l лопатки к среднему диаметру D в последних ступенях газовых турбин $l/D = 1/3 - 1/5$.

От относительной длины лопатки и окружной скорости U на ее среднем диаметре зависит напряжение σ_p от центробежных сил (в МПа). У корня рабочих лопат без бандажа [2]

$$\sigma_p = 10^{-6} \left(1 + \frac{F_{\Pi}}{F_{\kappa}} \right) \rho_{\Pi} \frac{l}{D} U^2, \quad (3)$$

где F_{Π} и F_{κ} — площадь сечения профиля рабочей лопатки у периферии и корня; $\rho_{\Pi} = 8200 \text{ кг/м}^3$ — плотность металла лопатки. Обычно рекомендуется, чтобы $\sigma_p \leq 200 - 250$ МПа. Например, при $F_{\Pi}/F_{\kappa} = 0,3$; и $U = 300 \text{ м/с}$ из (3) следует, что $\sigma_p = 240$ МПа.

Частота вращения n турбины

$$n = \frac{60 \cdot U}{3,14 \cdot D}. \quad (4)$$

Окружная скорость на среднем диаметре в стационарных ГТУ из условий прочности и долговечности не должна превышать 300—320 м/с, причем последняя цифра относится к турбинам с относительно короткими лопатками $l/D \leq 0,25$.

Из (4) следует, что частота вращения турбины главным образом зависит от ее среднего диаметра, который, как следует из (1) и (2), связан с расходом воздуха ГТУ следующим образом:

$$D = \sqrt{\frac{G_b}{3,14 \cdot C_{2a} \cdot \rho_2 \cdot \frac{l}{D}}}. \quad (5)$$

Расход воздуха зависит от эффективной N_e и удельной $N_{уд} = N_e / N_{yg}$ мощности ГТУ:

$$G_b = \frac{N_e}{N_{уд}}. \quad (6)$$

Удельная мощность пропорциональна разности работы турбины и работы компрессора и увеличивается с ростом температуры газа перед турбиной t_T и коэффициента полезного действия (КПД) турбины и компрессоре. На рис. 1 показана зависимость удельной мощности и эффективного КПД η_e энергетических ГТУ 1992—2004 гг. выпуска мощностью от 25 000 кВт и более [1]. Видно, что в современных ГТУ КПД достигает 35—38%, а удельная мощность 320—380 кВт/(кг/с). Заметим, что эти цифры получены, когда испытания проводились без сопротивлений на входе и выходе из ГТУ.

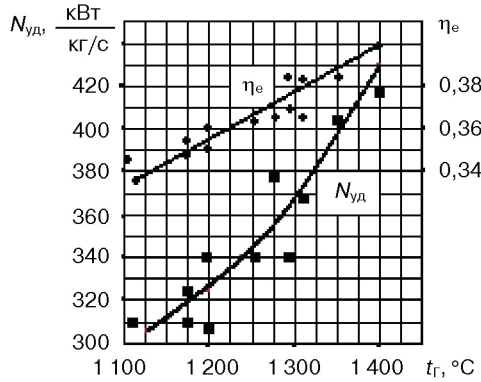


Рис. 1. Зависимость удельной мощности и эффективного КПД ГТУ от температуры газа на входе в турбину: $\pi_k = 12-20$

Если принять, что $\rho_2 = 0,414 \text{ кг/м}^3$, $C_{2a} = 140 \text{ м/с}$, то из (4), (5) и (6) следует

$$n = 257,8 \cdot U \sqrt{G_b \frac{l}{D}} = 257,8 \cdot U \sqrt{\frac{N_{уд}}{N_e} \frac{l}{D}}. \quad (7)$$

На рис. 2 показаны зависимости среднего диаметра турбины, длины лопатки последней ступени, расхода воздуха и частоты вращения от ее мощности и относительной длины лопатки при $N_{уд} = 350 \text{ кВт/(кг/с)}$ и $U = 300 \text{ м/с}$. Видно, что частота вращения увеличивается с повышением относительной длины лопатки с $l/D = 0,25$ до $l/D = 0,33$. При мощности ГТУ в диапазоне 30—50 МВт можно иметь частоту вращения турбины, равную 3000 мин^{-1} . При мощности более 150 МВт надо переходить на частоту вращения 1500 мин^{-1} . Длина турбинной лопатки последней ступени в зависимости от мощности равна 0,45—0,85 м.

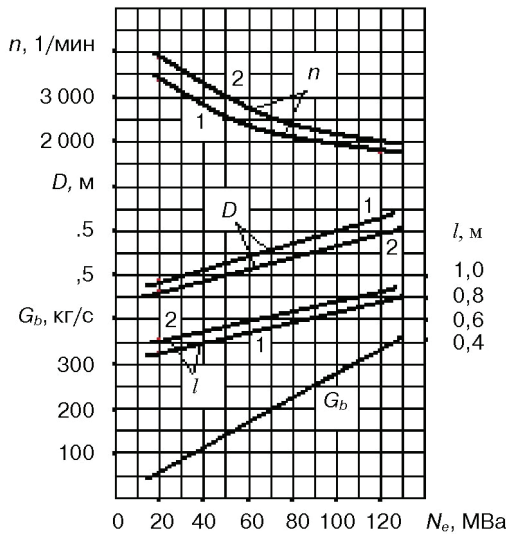


Рис. 2. Зависимость расхода воздуха, длины лопатки последней ступени турбины, среднего диаметра турбины и частоты вращения одновальной ГТУ от мощности:

$$U = 300 \text{ м/с}, N_{уд} = 350 \text{ кВт/(кг/с)}, N_{2a} = 140 \text{ м/с}$$

В случае если $n = 3600 \text{ мин}^{-1}$, надо изменить l/D и осевую скорость C_{2a} . Увеличение C_{2a} повысит потери с выходной скоростью $(C_{2a}/C_{ад})^2$, которые в ГТУ (параметры их приведены на рис. 1) составляют 0,01—0,015. Поэтому небольшое увеличение C_{2a} незначительно отразится на КПД турбины.

Таким образом, частота вращения ГТУ обратно пропорциональна квадратному корню из ее мощности.

В случае если величина n не совпадает со стандартной (1500 или 300 мин^{-1}), следует изменить либо окружную скорость, либо относительную высоту лопатки последней ступени турбины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Трухний А.Д.* Основы современной энергетики. — М.: МЭИ, 2001.
- [2] *Щегляев А.В.* Паровые турбины. — М.: Энергоатомиздат, 1993.

OUTPUT AND ROTATION FREQUENCY OF SINGLE-SHAFT GAS TURBINE

**Yu.A. Antipov, I.A. Barsky,
I.K. Shatalov**

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

The equation (7) gives dependence between single-shaft gas turbine output and rotation frequency.

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