

УДК 621.438

ОСНОВНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РЕЖИМ РАБОТЫ СТРУЙНО-РЕАКТИВНЫХ ТУРБИН

Ванеев С.М., к. т. н.,
Бережной А.С., асп.*
Сумский государственный университет,
Королев С.К., ст. науч. сотрудник
ОАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе»
Тел. (0619) 42-04-42

Аннотация – в статье рассмотрены основные интегральные коэффициенты, характеризующие режим работы струйно-реактивной турбины: коэффициент неплотности газового тракта $\alpha_{ум}$, коэффициент сопротивления вращения ротора в окружающей среде $K_{с.в}$, коэффициент восстановления полного давления σ . Показана их связь с соответственными тратами мощности турбины, более детально рассмотрены методы определения коэффициента $K_{с.в}$.

Ключевые слова – интегральные коэффициенты, струйно-реактивная турбина, коэффициент неплотности газового тракта $\alpha_{ум}$, коэффициент сопротивления вращения ротора в окружающей среде $K_{с.в}$, коэффициент восстановления полного давления σ .

Основными элементами струйно-реактивной турбины (СРТ) являются (см. рис. 1) подводящее (питающее) сопло (ПС) 1 и ротор, состоящий из полого вала 2 с радиальными трубками 3, консольно закрепленными на валу. На концах трубок имеются тяговые сопла (ТС) 4. Газ через питающее сопло подводится в полый вал ротора и далее по газовому тракту к ТС.

В тяговом сопле потенциальная энергия сжатого газа преобразуется в кинетическую энергию истекающей со сверхзвуковой скоростью из ТС струи, которая создает реактивную силу тяги и, как следствие, крутящий момент на валу турбины.

Основным коэффициентом, характеризующим энергетическую степень совершенства струйно-реактивной турбины, является коэффициент полезного действия (КПД).

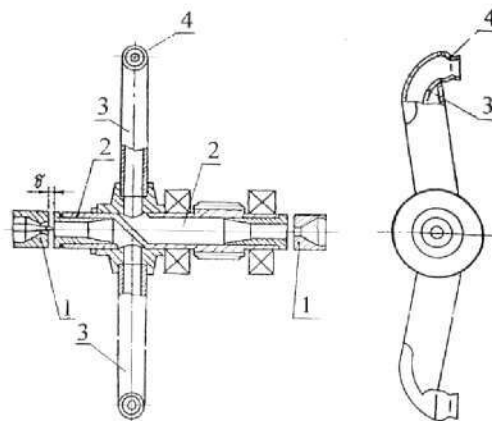


Рис. 1. Конструктивная схема струйно-реактивной турбины

Под КПД турбомашин, как известно, понимают отношение полезного эффекта к располагаемой работе [1, 2]. Для СРТ в качестве полезного эффекта должна быть принята мощность на валу турбины, а в качестве располагаемой работы - работа в единицу времени, которую может совершить рабочее тело в изэнтропном процессе расширения в том же диапазоне давлений, что и в действительном процессе, т.е. располагаемая мощность. Тогда

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_s} = \frac{N_T}{G_n h_s},$$

где η_T - изэнтропный КПД СРТ;

N_T - мощность на валу СРТ;

N_s - располагаемая мощность;

G_n - расход газа через питательное сопло СРТ;

h_s - изэнтропная работа расширения 1 кг рабочего тела от параметров торможения на входе СРТ (P_n^*, T_n^*) до давления окружающей среды ($P_{окр.ср}$).

В работе [3] были рассмотрены структура потерь энергии и структура КПД струйно-реактивной турбины. Мощность на валу турбины определялась как

$$N_T = M_T \omega_T,$$

где M_T - момент на валу СРТ;

ω_T - угловая скорость вала СРТ.

Момент на валу СРТ получен по теореме об изменении момента количества движения потока газа относительно оси вращения с учетом нерасчетности тягового сопла и аэродинамического сопротивления окружающей среды при вращении ротора.

С другой стороны, понимая под потерями энергии в СРТ, как и в любой турбомашине, разность работы идеальной турбины, т.е. работающей с изэнтропным расширением рабочего тела в газовом тракте и без аэродинамического сопротивления вращающегося

ротора, и работы на валу действительной турбины, КПД турбины можно выразить следующим образом

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_s} = \frac{N_s - N_T}{N_s} = 1 - \frac{\Delta N_T}{N_s},$$

где ΔN_T - суммарные потери энергии в СРТ.

По источникам возникновения в СРТ можно выделить потери, обусловленные гидравлическими сопротивлениями по длине газового тракта ротора СРТ, скачками уплотнений, наличием зазора между торцом вала и срезом подводящего сопла, нерасчетностью тягового сопла, вращением ротора в среде вязкого газа, потери с выходной скоростью.

Для расчетного режима

$$\Delta N_T = \Delta N_z + N_{дин} + N_{ут} + N_{с.в},$$

где ΔN_z - потери энергии, обусловленные гидравлическими сопротивлениями по длине газового тракта и скачками уплотнений в газовом тракте ротора СРТ;

$N_{дин}$ - энергия, теряемая с выходной скоростью;

$N_{ут}$ - энергия, теряемая с утечками в окружающую среду;

$N_{с.в}$ - энергия, теряемая на аэро- динамическое сопротивление вращающегося ротора.

Выражая отдельные виды потерь энергии через относительные величины (отношение соответствующей потери энергии (мощности) к располагаемой мощности) преобразуем последнее выражение к виду

$$\eta_T = 1 - \xi_z - \xi_{дин} - \xi_{с.в} - \xi_{ут},$$

где ξ_z - относительные потери энергии в газовом тракте ротора (гидравлические и волновые);

$\xi_{дин}$ - относительные потери с выходной скоростью;

$\xi_{с.в}$ - относительные потери на аэродинамическое сопротивление;

$\xi_{ут}$ - относительные потери от утечек.

В работе [3] получены зависимости потерь энергии от приведенной окружной скорости рабочего колеса (см. рис. 2, 3).

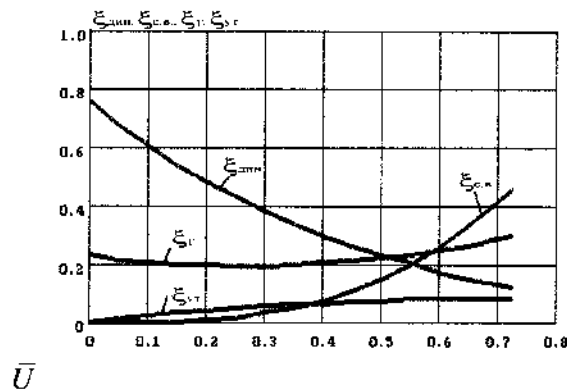


Рис. 2. Зависимость относительных величин потерь энергии от приведенной окружной скорости ротора

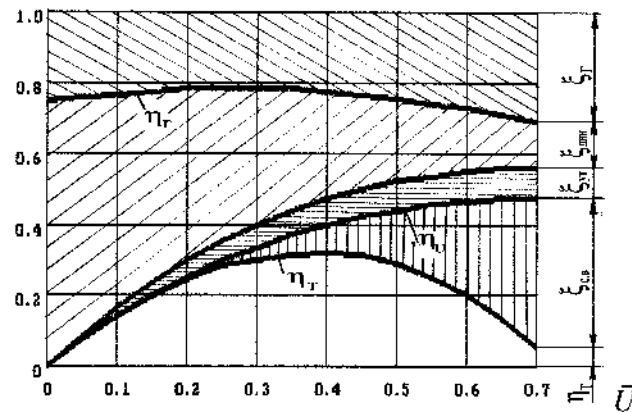


Рис. 3. Баланс энергии в струйно-реактивной турбине

Рассмотрим отдельные виды потерь мощности в СРТ.

1) Относительные потери на аэродинамическое сопротивление

$$\xi_{с.в} = \frac{N_{с.в}}{N_s} = \frac{M_{с.в} \omega_r^3}{N_s} = \frac{K_{с.в} U^3}{L^3 G_n h_s}; \quad (1)$$

где $K_{с.в}$ - комплексный коэффициент аэродинамического сопротивления вращающегося ротора;

U - окружная скорость газа в центре среза тягового сопла;

L - расстояние от центра среза тягового сопла до оси вращения.

Из рисунков 2, 3 видно, что с увеличением окружной скорости ротора СРТ при прочих равных условиях резко увеличиваются потери на аэродинамическое сопротивление вращению в среде вязкого газа, что приводит к снижению выходного КПД турбины. Как видно из формулы (1) уменьшать потери на аэродинамическое сопротивление вращению при неизменных режимных параметрах можно за счет уменьшения коэффициента $K_{с.в}$.

В предыдущей статье «Влияние некоторых режимных параметров на оптимальную окружную скорость рабочего колеса струйно-реактивной турбины» был рассмотрен коэффициент аэродинамического сопротивления вращению ротора СРТ в окружающей среде $K_{с.в}$, для существующих типов струйно-реактивных турбин он изменяется в пределах $K_{с.в} = (2-6,5) \cdot 10^{-7}$ кг·м² и зависит от конструктивного исполнения турбины (реверсивное или нереверсивное исполнение), размеров и формы радиальных трубок рабочего колеса и частоты вращения ротора.

Величину $K_{с.в}$ определяют экспериментальным путем. Ее можно найти несколькими способами:

а) по измеренному моменту аэродинамического сопротивления

$$K_{с.в} = M_{с.в} / \omega^2;$$

где $M_{c.в}$ - момент сопротивления вращению ротора в окружающей среде (момент аэродинамического сопротивления вращающегося ротора).

Следует отметить, что в значение $M_{c.в}$ входит также момент сопротивления вращению ротора в подшипниках. В статье [4] была приведена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления $K_{c.в}$ от частоты вращения ротора СРТ (см. рис. 4), определенного в результате прокрутки ротора на экспериментальном стенде, позволяющем измерить момент аэродинамического сопротивления $M_{c.в}$.

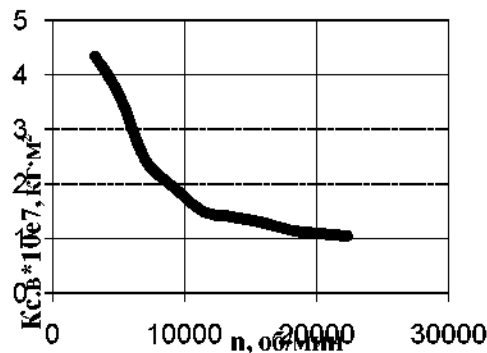


Рис. 4. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от частоты вращения ротора СРТ

б) по измеренному моменту на валу турбины

$$K_{c.в} = \frac{M_U - M_T}{\omega^2} = \frac{R_W D / 2 - G_m \omega D^2 / 4 - M_T}{\omega^2},$$

где M_U - момент, определенный по теореме об изменении момента количества движения потока газа относительно оси вращения, обусловленный взаимодействием потока газа с элементами проточной части СРТ;

M_T - момент на валу СРТ;

D - диаметр расположения осей тяговых сопел относительно оси вращения;

R_W - сила тяги ТС в относительном движении, которая определяется следующим образом

$$R_W = G_m W_{cp.m} + f_{cp.m} (P_{cp.m} - P_{окр.ср}),$$

где $W_{cp.m}$ - скорость газа на срезе ТС в относительном движении;

$f_{cp.m}$ - площадь среза ТС;

$P_{cp.m}, P_{окр.ср}$ - соответственно давления газа на срезе ТС и в окружающей среде;

$G_m = G_n (1 - \alpha_{ym})$ - расход газа срезе ТС;

$$G_n = \frac{m_G P_n^* f_{кр.н}}{\sqrt{RT_n^*}} - \text{расход газа через ПС};$$

$$m_G = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} - \text{коэффициент, зави-сящий от показателя}$$

изоэнтропы газа;

$f_{кр.н}$ - площадь критического сечения ПС.

Недостатком данного способа нахождения $K_{с.в}$ является необходимость определения момента на валу турбины M_T , для экспериментального получения которого необходимо специальное нагрузочное устройство.

в) по измеренным оборотам холостого хода (в этом случае $M_T = 0$)

$$K_{с.в} = \frac{M_U}{\omega_{xx}^2} = \frac{R_W D / 2 - G_m \omega D^2 / 4}{\omega_{xx}^2},$$

где ω_{xx} - угловая скорость вращения СРТ на холостом ходу, для определения которой дополнительного нагрузочного устройства не требуется.

Этот способ является наименее точным, так как позволяет определить лишь одно значения коэффициента $K_{с.в}$, соответствующее работе СРТ в холостом режиме, но для предварительных расчетов данный метод вполне может использоваться.

2) Относительные потери с выходной скоростью

$$\xi_{дин} = \frac{N_{дин}}{N_s} = \frac{G_m h_{дин}}{G_n h_s} = \frac{G_m C_{сп.м}^2}{G_n 2h_s} \left(\frac{C_{сп.м}}{C_s} \right)^2 (1 - \alpha_{ym}) \bar{C}_{сп.м}^2 (1 - \alpha_{ym}).$$

3) Относительные потери от утечек

$$\xi_{ym} = \frac{N_{ym}}{N_s} = \frac{\Delta G_{ym} h_{ym}}{G_n h_s} = \frac{G_n - G_m}{G_n} \cdot \frac{h_U}{h_s} = \alpha_{ym} \eta_U,$$

где h_{ym} - работа 1 кг газа, теряемого с утечками. Так как утечки происходят из осевого канала ротора СРТ, то практически они соответствуют потерям работы на окружности колеса $h_{ym} = h_U$.

Эти два вида потерь, как видно, напрямую зависят от коэффициента утечек α_{ym} .

$$\alpha_{ym} = \frac{\Delta G_{ym}}{G_n} = \frac{G_n - G_m}{G_n} = 1 - \frac{G_m}{G_n}$$

В расчетах обычно задаются данным коэффициентом в пределах 0–0,2.

4) Относительные потери в газовом тракте ротора (гидравлические и волновые)

$$\xi_z = \frac{\frac{\Delta N_z}{N_s} \cdot \frac{\Delta N_T - N_{\text{дин}} - N_{c.с} - N_{ym}}{N_s}}{\frac{N_s - N_T - N_{\text{дин}} - N_{c.с} - N_{ym}}{N_s}}$$

Также потери энергии в проточной части СРТ можно оценивать коэффициентом восстановления полного давления σ . Этот коэффициент может быть отнесен к разным сечениям проточной части и рассмотрен как в абсолютном, так и в относительном движении; например, в СРТ целесообразно гидравлические потери и волновые потери в газовом тракте ротора учитывать интегрально коэффициентом восстановления полного давления в относительном движении, считая процессы течения в подводящем и тяговом соплах изоэнтропными

$$\sigma_W = \frac{P_{W1}^*}{P_{Wm}^*},$$

где P_{Wm}^* - полное давление на срезе тягового сопла в относительном движении;

P_{W1}^* - полное давление на входе во втулку-диффузор в относительном движении; т.к. $U_1 = 0$, то

$$P_{W1}^* = P_1^* \cong P_n^*,$$

где P_1^* - полное давление на входе во втулку-диффузор в абсолютном движении.

При этом потери полного давления в подводящем и тяговом соплах, в силу достаточной изученности процесса течения в соплах, могут быть выбраны из соответствующей литературы.

При накоплении большого экспериментального материала возможен учет каждой из составляющих потерь энергии в СРТ. Однако часто трудно выделить и исследовать потери, обусловленные каким либо одним фактором. Поэтому удобно оценивать потери энергии интегральным способом через определенные коэффициенты. В СРТ в качестве таких интегральных коэффициентов удобно принять: коэффициент восстановления полного давления в проточной части СРТ в целом - σ ; коэффициент утечек - α_{ym} и комплексный коэффициент аэродинамического сопротивления вращающегося ротора - $K_{c.с}$. Эти интегральные коэффициенты удобно использовать при разработке методики расчета струйно-реактивной турбины.

Литература

1. Етифанова В.И. Компрессорные и расширительные турбомашини радиального типа / В.И. Етифанова. - М.: Машиностроение, 1984.

2. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников. - М.: Машиностроение, 1970.
3. Ванеев С.М. Структура потерь энергии и КПД струйно-реактивной газовой турбины / С.М. Ванеев // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. - № 9(30)-10(31). - 2001.- С. 207-214.

ОСНОВНИ КОЕФІЦІЄНТИ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ РЕЖИМ РОБОТИ СТРУМИННО-РЕАКТИВНИХ ТУРБІН

Ванеев С.М., Бережной А.С., Королев С.К.

Анотація – у статті розглянуті основні інтегральні коефіцієнти, характеризуючі режим роботи струйно-реактивної турбіни. До вищезазначених коефіцієнтів відносяться: коефіцієнт нещільності газового тракту α_{ym} , коефіцієнт опору обертання ротора в навколишньому середовищі $K_{c,e}$, коефіцієнт відновлення повного тиску σ . Приведений їхній зв'язок з відповідними втратами потужності турбіни, більш детально розглянуті методи визначення коефіцієнта $K_{c,e}$.

MAIN DESCRIBE WORKING CONDITIONS JETS COEFFICIENTS

S. Vaneev, A. Berejnoy, S. Korolev

Summary

In the article basic integral coefficients, characterizing the turbo-jet turbine's mode work, considered. The above-mentioned coefficients include: leakage factor α_{ym} , coefficient of rotor's rotation resistance to an environment $K_{c,e}$, coefficient of refreshing total pressure σ . Brought their connection with the corresponding losses of turbine's power, determination methods of coefficient $K_{c,e}$ considered more in detail.