

Рис. 1

Видно, что при уменьшении α_2 политропический к.п.д. диффузора χ и коэффициенты полного давления существенно падают.

Полученные зависимости можно использовать при определении параметров потока на входе в свободную турбину для двухвальных и трехвальных ГТД.

621.43.052

ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ ТУРБИНЫ ОТ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ

Канд. техн. наук Ю.А. АНТИПОВ, канд. техн. наук М.В. ЛОБАН, канд. техн. наук, доц. И.К. ШАТАЛОВ

Получено уравнение для определения влияния радиального зазора в рабочих лопатках турбины на степень реактивности.

The equation for calculating influence of blades radial clearance on turbine reaction ratio is received.

Степень реактивности ρ ступени равна

$$\rho = 1 - \left(\frac{c_1}{\varphi c_{ад}} \right)^2,$$

где c_1 — абсолютная скорость на выходе из соплового аппарата; $c_{ад} = \sqrt{2H}$ — скорость, соответствующая адиабатическому теплоперепаду H ; φ — коэффициент скорости.

Продифференцировав это уравнение, получим

$$d\rho = - \frac{2\sqrt{1-\rho}}{\varphi} \frac{dc_1}{c_{ад}}. \quad (1)$$

Будем оценивать влияние на ρ только радиального зазора. Осевой зазор при оптимальных отношениях хорды к длине лопатки влияет на реактивность гораздо слабее, чем радиальный.

Пренебрежем, ввиду малости [1], перетоком газа с вогнутой на выпуклую часть профиля рабочих лопаток. Тогда расход газа через сопловой аппарат равен сумме расходов через рабочие лопатки и радиальный зазор в них

$$c_{1a}\gamma_1 F_1 = c_{2a}\gamma_2 F_2 + c_{3a}\gamma_3 F_3, \quad (2)$$

где c_{1a} , c_{2a} , c_{3a} — осевые скорости на выходе из соплового аппарата, рабочих лопаток и радиального зазора; F_1 , F_2 , F_3 — осевые площади соплового аппарата, рабочего колеса и радиального зазора; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — плотности газа.

Приняв, что плотность газа на выходе из колеса γ_2 и на выходе из зазора γ_3 равны, из (2) получим

$$\frac{c_{1a}}{c_{ад}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \frac{F_2}{F_1} \left(\frac{c_{2a}}{c_{ад}} + \frac{F_3}{F_2} \frac{c_{3a}}{c_{ад}} \right). \quad (3)$$

Осевая скорость на выходе, из зазора

$$c_{3a} = \mu_3 \sqrt{c_{1a}^{\prime\prime 2} + \rho^{\prime\prime} c_{ад}^2}, \quad (4)$$

где $\rho^{\prime\prime}$ — степень реактивности у периферии.

Осевая скорость на входе в зазор $C_{1a}^{\prime\prime}$ при законе постоянства циркуляции будет

$$C_{1a}^{\prime\prime} = C_{1a},$$

При законе $\alpha_1 = \text{const}$

$$C_{1a}^{\prime\prime} = C_{1a} \left(\frac{r}{r^{\prime\prime}} \right)^{\varphi^2 \cos^2 \alpha_1}.$$

Коэффициент расхода через зазор μ_3 можно определить из [1], который в среднем он равен 0,6...0,8.

Отношение плотностей газа [2]

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \pi_r^z [1 + \rho(\pi_r^{0,25} - 1)]^y, \quad (5)$$

где $Z = \frac{k-1}{k}(\varphi^2 - \eta_n)$; $y = \left(\frac{k}{k-1} - \varphi^2 \right)$; π_r — степень понижения давления.

В связи с тем, что лопаточный (адиабатический) к.п.д. очень близок к φ^2 , можно принять $z = 0$ и $\pi_r^z = 1$, так как $\frac{k-1}{k} = 0,25$.

Продифференцировав (3), с учетом (4) и (5), получим

$$d \left(\frac{c_1}{c_{ад}} \right) = \mu_3 \frac{F_2}{F_1} \frac{1}{\sin \alpha_1} [1 + \rho(\pi_r^{0,25} - 1)]^y \sqrt{\varphi^2 \sin^2 \alpha_1 (1 - \rho) + \rho^{\prime\prime}} \frac{dF_3}{F_3}. \quad (6)$$

Подставив это выражение в (1) и переходя от бесконечно малых приращений к конечным, получим

$$\Delta \rho = -\mu_3 \frac{1}{\sin \alpha_1} [1 + \rho(\pi_r^{0,25} - 1)]^y \sqrt{\varphi^2 \sin^2 \alpha_1 (1 - \rho) + \rho^{\prime\prime}} \frac{\delta}{l}. \quad (7)$$

Здесь принято, что $dF_3 = \Delta F_3$, $\frac{F_3}{F_2} = \frac{\delta}{l}$, где δ — радиальный зазор, l — длина лопатки.

Минус в правой части (7) показывает, что увеличение радиального зазора приводит к уменьшению реактивности.

Зависимость Δp при относительном радиальном зазоре $\frac{\delta}{l} = 0,01 = 1\%$ от степени

реактивности и угла выхода из соплового аппарата показана на рис. 1 ($\pi_T = 1,7$; $\varphi = 0,96$).

Видно, что величина Δp уменьшается с ростом α_1 . В среднем можно считать, что увеличение радиального зазора на 1% уменьшает степень реактивности на 0,015...0,02.

На рис. 2 приведена зависимость степени реактивности от отношения радиального зазора ($\pi_T = 1,7$, $\alpha_1 = 20^\circ 15'$, $U/c_{ад} = 0,475$), построенная с помощью формулы (7). Там же точками приведены результаты экспериментов, проведенных В.М. Акимовым в ЦИАМ на турбине. Видно хорошее совпадение расчета с экспериментом.

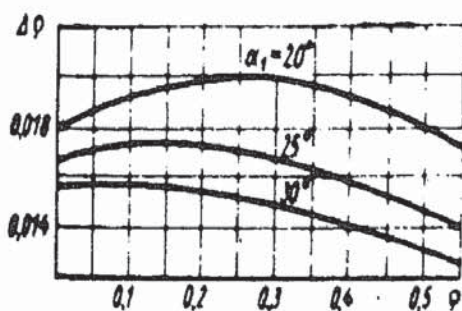


Рис. 1

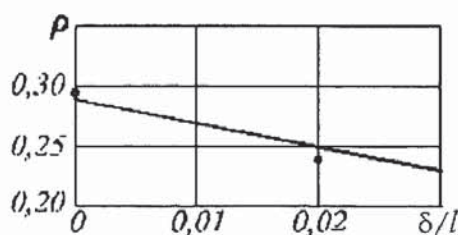


Рис. 2. Зависимость степени реактивности от относительного радиального зазора в турбине: — по формуле (7); • — опыты В.М. Акимова

Расчет по формуле (7) показывает, что при относительно коротких лопатках без бандаж, когда $\frac{\delta}{l} = 0,02 - 0,03$, необходимо выбирать повышенную расчетную степень реактивности, так как в рабочем состоянии она может значительно (на 0,03 – 0,05) снизиться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ж и р и ц к и й Г. С. Газовые турбины авиационных двигателей. — М.: Оборонгиз, 1963. — 605 с.
- Б а р с к и й И. А. Упрощенный метод расчета характеристик газовых турбин/ Труды Научно-исследовательского института двигателей. — М., №9. — С. 80—129.