

С.М. Ванеєв, канд. техн. наук,

А.С. Бережной

Сумський державний університет,

С.К. Королев

ОАО «Сумське НПО ім. М.В. Фрунзе»

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОПТИМАЛЬНУЮ ОКРУЖНУЮ СКОРОСТЬ РАБОЧЕГО КОЛЕСА СТРУЙНО-РЕАКТИВНОЙ ТУРБИНЫ

Розглянуто вплив основних режимних параметрів на оптимальну окружну швидкість робочого колеса струйно-реактивної турбіни. Побудовано графічні залежності величини оптимальної окружної швидкості від повного тиску на вході в турбіну при змінних довжині плеча ротора, коефіцієнті втрати робочого тіла, коефіцієнті опору обертання ротора. Проаналізовано кількісний вплив кожного з цих параметрів.

In the article the influence of basic regime parameters on optimum circumferential velocity of reaction-jet turbine's driving wheel considered. Graphic dependences of optimum circumferential velocity size are built on total pressure in a turbine inlet at variables length of shoulder of rotor, coefficient of working medium loss, coefficient of a rotor rotation resistance. Quantitative influence is analyzed each of these parameters.

Введение

Струйно-реактивные турбины (СРТ) применяются как в реверсивном, так и в нереверсивном исполнениях. На рис. 1 представлена схема струйно-реактивной турбины (СРТ) в реверсивном исполнении.

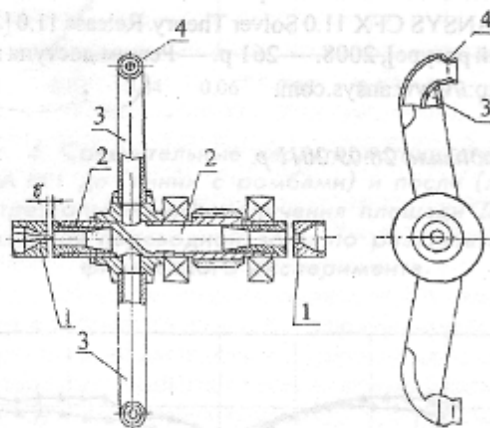


Рис. 1. Схема реверсивной струйно-реактивной турбины.

Конструктивно СРТ очень проста (см. рис. 1). Она содержит подводящее устройство (питающее сопло) 1 и ротор, состоящий из полого вала 2 и рабочего колеса, выполненного в виде двух или более радиальных трубок 3, консольно закрепленных (приваренных) на валу, на свободном конце которых имеются тангенциально направленные тяговые сопла (ТС) 4. Полости вала и трубок соединены и образуют непрерывный газовый тракт от торцевого входа в осевой канал (полость) вала до ТС.

Принцип действия СРТ заключается в преобразовании потенциальной энергии сжатого газа в кинетическую энергию сверхзвуковой струи, истекающей из тягового сопла. В результате образуется реактивная сила тяги на ТС и соответственно крутящий момент на валу турбины, а при вращении вала совершается механическая работа.

Результаты исследований

В работах [1], [2] были рассмотрены структура потерь энергии, структура КПД и методика расчета характеристик струйно-реактивной турбины, в работе [3] получена зависимость для оптимальной (соответствующей максимуму изэнтропного КПД) приведенной окружной скорости рабочего колеса \bar{U} .

$$(\bar{U})_{opt} = \frac{-(1-\alpha_{ym}) + \sqrt{(1-\alpha_{ym})^2 + \frac{3K_{ce}(C_{cp,m})_{n=0}(1-\alpha_{ym})}{L^2 G_n}}}{\frac{3K_{ce} C_s}{L^2 G_n}} = \frac{L^2 G_n (1-\alpha_{ym}) \left[\sqrt{1 + \frac{3K_{ce}(C_{cp,m})_{n=0}}{L^2 G_n (1-\alpha_{ym})}} - 1 \right]}{3K_{ce} C_s} \quad (1)$$

где C_s — скорость при изэнтропном расширении газа от параметров торможения на входе СРТ (P_n^*, T_n^*) до давления окружающей среды ($P_{окр,ср}$); L — расстояние от центра среза тягового сопла до оси вращения; G_n — массовый расход газа через питающее сопло СРТ; α_{ym} — коэффициент утечек в окружающую среду; K_{ce} — комплексный коэффициент аэродинамического сопротивления вращающегося ротора; $(C_{cp,m})_{n=0}$ — скорость газа на сре-

зе ТС в пусковому режимі.

При виводі цієї формули значення $K_{c,в}$ прийнято постійним.

Если прийняти $\alpha_{ут} = 0$, то рівняння (1) преобразується к виду

$$(\bar{U})_{opt} = \frac{L^3 G_n \sqrt{1 + \frac{3K_{c,в} (C_{cp,m})_{n=0}}{L^3 G_n} - 1}}{3K_{c,в} C_s} \quad (2)$$

Оптимальна окружна скорость рабочего колеса вычисляется по формуле

$$U_{opt} = \bar{U}_{opt} C_s \quad (3)$$

В [3] получена зависимость U_{opt} от давления заторможенного потока на входе в турбину P_n^* при $\alpha_{ут} = 0$ и постоянных значениях $K_{c,в}$ и L .

Рассмотрим влияние этих параметров ($\alpha_{ут}$, $K_{c,в}$ и L) на U_{opt} .

На рис. 2 показаны зависимости окружной скорости U_{opt} , вычисленной по формуле (1) и соответствующей максимальному значению КПД, от давления заторможенного потока на входе в турбину P_n^* для воздуха при температуре заторможенного потока на входе в турбину $T_n^* = 300$ К, диаметре критического сечения питающего сопла $d_{кр,n} = 4$ мм, $L = 0,1$ м, $K_{c,в} = 2 \cdot 10^{-7}$ кг · м² при варьированной величине коэффициента утечек $\alpha_{ут}$.

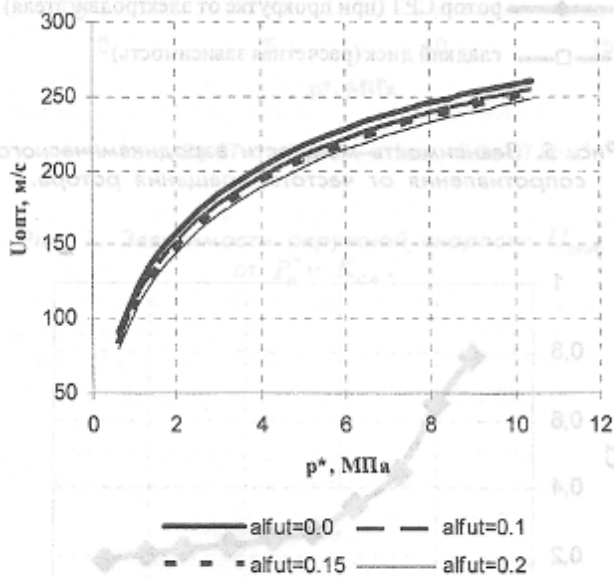


Рис. 2. Влияние коэффициента утечек на оптимальную окружную скорость ($L=0,1$ м, $k_{sw}=2e-07$ кг · м²).

Влияние длины плеча ротора на оптимальную окружную скорость рабочего колеса СРТ при прочих равных параметрах показано на рис. 3.

Выводы

Позволяя итог, можно сказать, что на величину оптимальной окружной скорости рабочего колеса СРТ в реактивной турбине /

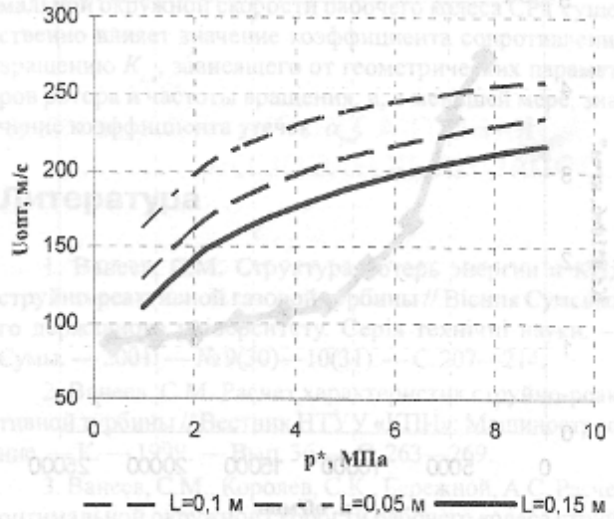


Рис. 3. Влияние плеча ротора на оптимальную окружную скорость ($\alpha_{ут} = 0,0$).

Более детально рассмотрим коэффициент аэродинамического сопротивления вращению ротора СРТ в окружающей среде $K_{c,в}$.

Для известных типов струйно-реактивных турбин коэффициент $K_{c,в}$ изменяется в пределах $K_{c,в} = (2 - 6,5) \cdot 10^{-7}$ кг · м² и зависит от конструктивного исполнения турбины (реверсивное или нереверсивное исполнение), размеров и формы радиальных трубок рабочего колеса и частоты вращения ротора.

Если не учитывать взаимное влияние плеч ротора СРТ, то момент аэродинамического сопротивления одного плеча ротора определяется выражением [4-6]

$$M'_{c,в} = c_x \rho_{окр,сп} \frac{d_{нар} H^4}{8} \omega_T^2 = K'_{c,в} \omega_T^2,$$

где c_x — коэффициент лобового сопротивления плеча ротора; $\rho_{окр,сп}$ — плотность окружающей среды; H — длина плеча ротора; $d_{нар}$ — наружный диаметр трубки плеча ротора.

Для двухплечевого ротора

$$M''_{c,в} = \frac{c_x \rho_{окр,сп} d_{нар} H^4}{4} \omega_T^2 = K''_{c,в} \omega_T^2 \quad (3)$$

В этом случае, как видно, коэффициент аэродинамического сопротивления определяется только геометрическими размерами плеч, их формой, плотностью окружающей среды и не зависит от скорости вращения ротора. Однако экспериментальные исследования показывают, что вследствие взаимного влияния плеч, когда они движутся в спутном потоке друг за другом, коэффициент $K_{c,в}$ зависит от угловой скорости вращения ротора (рис. 4).

УДК 621.478

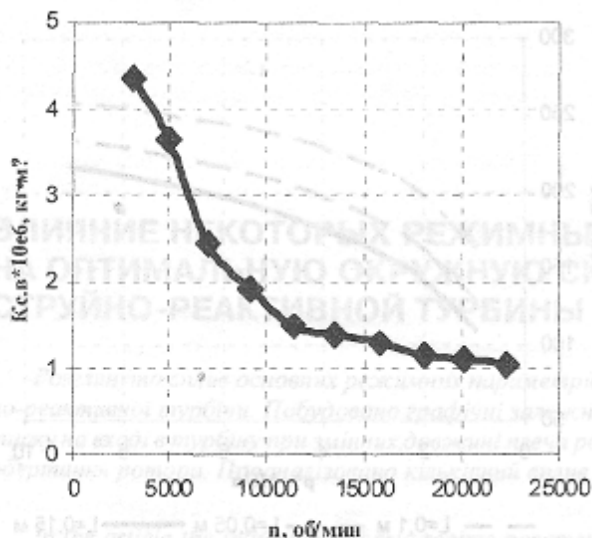


Рис. 4. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от частоты вращения ротора СРТ.

Величина $K_{c.v}$ была определена в результате прокрутки ротора на экспериментальном стенде, позволяющем измерить момент аэродинамического сопротивления $M_{c.v}$. Она определялась по формуле

$$K_{c.v} = M_{c.v} / \omega^2.$$

Как видно, коэффициент аэродинамического сопротивления существенно зависит от скорости вращения ротора СРТ и принятие его постоянным в расчетах может привести к большим погрешностям. Например, для титанового ротора (рис. 1), подвергающегося прокрутке, $K_{c.v}$, подсчитанный по формуле (4), будет равен

$$K_{c.v}^* = \frac{c_x \rho_{окр.ср} d_{нар}^4 H^4}{4} = \frac{0,6 \cdot 1,205 \cdot 0,014 \cdot 0,107^4}{4} = 3,317 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

На рис. 5 представлены зависимости мощности, затрачиваемой на аэродинамическое сопротивление при вращении ротора, изображенного на рис. 1, от частоты вращения при прокрутке его от электродвигателя и для гладкого диска. Для исследуемого ротора $N_{c.v}$ определялась по формуле

$$N_{c.v} = M_{c.v} \cdot \omega.$$

Результаты испытаний для гладкого диска взяты из работы [7], в которой $N_{c.v}$ вычисляется по формуле

$$N_{c.v} = \beta_{c.v} \cdot \rho_{окр.ср} \cdot \left(\frac{\omega_T \cdot H}{100}\right)^3 (2H)^2 \left(1 + 5 \frac{d_{нар}}{2H}\right), \text{ кВт},$$

где $\beta_{c.v}$ — коэффициент мощности трения о диск [7];

$$\beta_{c.v} = \frac{60}{Re^{0,28}};$$

Re — число Рейнольдса, определяемое по формуле

$$Re = \frac{2H^2 \omega_T}{\nu} = \frac{2H^2 \omega_T \rho_{окр.ср}}{\mu};$$

ν — коэффициент кинематической вязкости; μ — коэффициент динамической вязкости.

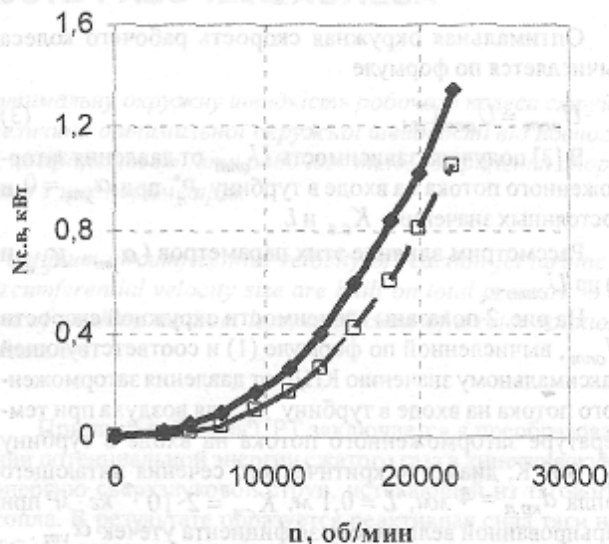


Рис. 5. Зависимость мощности аэродинамического сопротивления от частоты вращения ротора.

Рис. 5. Зависимость мощности аэродинамического сопротивления от частоты вращения ротора.

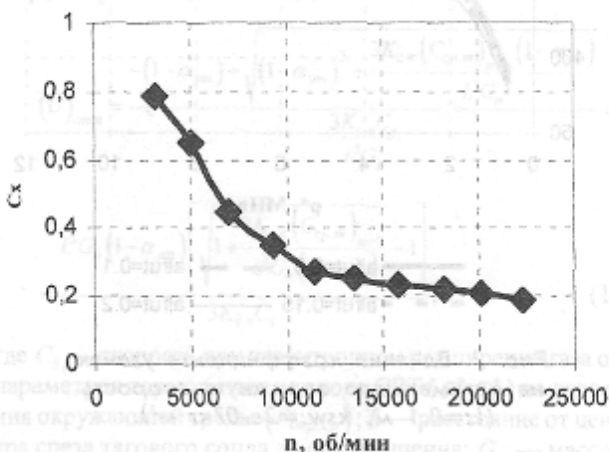


Рис. 6. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от частоты вращения ротора СРТ.

Как видно из графика, потери энергии на аэродинамическое сопротивление для ротора СРТ существенно больше, чем для гладкого диска. Поэтому заключение ротора СРТ в корпус в виде гладкого полого диска может дать положительный эффект.

Представляется целесообразным, по аналогии с результатами испытаний гладких дисков и обтекания тел различной формы потоком воздуха, выделить безразмерный коэффициент, учитывающий потери на аэродинамическое сопротивление. По структуре формул и с учетом безразмерных комплексов, принятых в аэродинамике, таким коэффициентом для ротора СРТ является коэффициент лобового сопротивления C_x . Зависимость этого коэффициента от частоты вращения ротора показана на рис. 6.

Из рисунка видно влияние P_n^* и $K_{св}$ на величину $U_{опт}$: чем больше P_n^* и меньше $K_{св}$, тем больше $U_{опт}$.

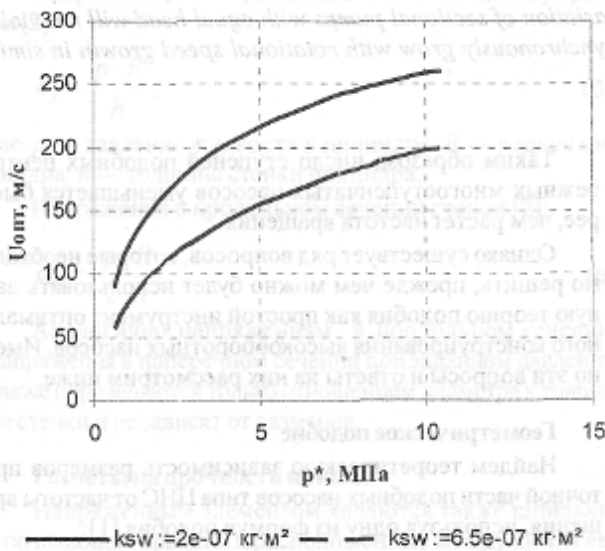


Рис. 7. Зависимости окружной скорости $U_{опт}$ от P_n^* и $K_{св}$.

Выводы

Подводя итог, можно сказать, что на величину оптимальной окружной скорости рабочего колеса СРТ существенно влияет значение коэффициента сопротивления вращению $K_{св}$, зависящего от геометрических параметров ротора и частоты вращения, и, в меньшей мере, значение коэффициента утечек $\alpha_{ум}$.

Литература

1. Ванеев, С.М. Структура потерь энергии и КПД струйно-реактивной газовой турбины // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. — Сумы. — 2001. — № 9(30)—10(31). — С. 207—214.
2. Ванеев, С.М. Расчет характеристик струйно-реактивной турбины // Вестник НТУУ «КПИ»: Машиностроение. — К. — 1999. — Вып. 36. — С. 263—269.
3. Ванеев, С.М., Королев, С.К., Бережной, А.С. Расчет оптимальной окружной скорости рабочего колеса струйно-реактивной турбины // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. — 2009. — № 4. — С. 22—29.
4. Саяпин, В.В. Оптимизация параметров пневмопривода со струйным двигателем // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. — М.: Машиностроение. — 1984. — Вып. 10. — С. 58—63.
5. Саяпин, В.В., Марочкина, И.А. Оптимизация параметров струйного двигателя по критерию минимума расхода газа // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. — М.: Машиностроение, 1987. — Вып. 13. — С. 96—102.
6. Исследование и экспериментальные работы по обработке и оптимизации пневматических приводов со струйно-реактивным двигателем для шаровых кранов: Отчет о НИР (ВНИИкомпрессормаш) / Рук. темы С.К.Королев. — Н ГР0870042515, инв. N 02870088015. — Сумы, 1987. — 180 с.
7. Наталевич, А.С. Воздушные микротурбины. — М.: Машиностроение, 1970. — 264 с.

Надійшла 28.09.2010 р.

Поскольку коэффициент потерь энергии на аэродинамическое сопротивление C_x зависит от частоты вращения ротора, то для определения оптимальной окружной скорости рабочего колеса СРТ необходимо учитывать зависимость C_x от частоты вращения ротора.

Учитывая зависимость коэффициента потерь энергии на аэродинамическое сопротивление C_x от частоты вращения ротора n и диаметра шпинделя d , можно записать:

$$C_x = \frac{M}{n^2 \cdot d^5} \cdot \mu d = \frac{M}{n^2} \cdot \mu$$

Это в свою очередь позволяет записать зависимость оптимальной окружной скорости рабочего колеса СРТ от частоты вращения ротора n и диаметра шпинделя d в виде:

$$U_{опт} = \frac{M}{n^2} \cdot \mu \cdot d$$

где μ — коэффициент потерь энергии на аэродинамическое сопротивление, зависящий от частоты вращения ротора n и диаметра шпинделя d .

Поскольку коэффициент потерь энергии на аэродинамическое сопротивление C_x зависит от частоты вращения ротора, то для определения оптимальной окружной скорости рабочего колеса СРТ необходимо учитывать зависимость C_x от частоты вращения ротора.

Учитывая зависимость коэффициента потерь энергии на аэродинамическое сопротивление C_x от частоты вращения ротора n и диаметра шпинделя d , можно записать:

$$C_x = \frac{M}{n^2 \cdot d^5} \cdot \mu d = \frac{M}{n^2} \cdot \mu$$

Это в свою очередь позволяет записать зависимость оптимальной окружной скорости рабочего колеса СРТ от частоты вращения ротора n и диаметра шпинделя d в виде:

$$U_{опт} = \frac{M}{n^2} \cdot \mu \cdot d$$

где μ — коэффициент потерь энергии на аэродинамическое сопротивление, зависящий от частоты вращения ротора n и диаметра шпинделя d .