

## ПОВЫШЕНИЕ КПД КОМПРЕССОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАДРОТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Незым В.Ю., Коркишко С.В., Никишов А.А.

Известно, что аэродинамическая эффективность компрессора существенно зависит от величины радиального зазора  $S_{PK}$  между его корпусом и концами рабочих лопаток. Влияние зазора на параметры особенно значительно в последних ступенях многоступенчатого компрессора, где относительные величины  $\bar{S}_{PK}$  достаточно велики. Во многих современных двигателях применяются истирающиеся вставки в корпусе над ротором, сводящие радиальный зазор к минимальному. Истирание части вставки концами профиля образует в ней сплошную кольцевую выточку (СКВ) прямоугольной формы в меридиональном сечении. Такие выточки можно оформлять в корпусе специально (рис. 1,а) в виде надроторного устройства, привлекающего конструктивной и технологической простотой. Как известно, надроторные устройства различных типов расширяют диапазон бесрывной работы компрессора, что сопровождается обычно снижением КПД. В практике двигателестроения, тем не менее, имеется ограниченный опыт повышения КПД компрессоров при использовании СКВ прямоугольной формы (например, КПД двигателей JT8D и JT9D, некоторые экспериментальные объекты и др.).

Ниже предпринята попытка обобщения известных автору опытных данных по применению СКВ прямоугольной формы в компрессорных ступенях. При этом объекты обобщения можно охарактеризовать следующим образом:

Ступень I – ступень четырехступенчатого экспериментального компрессора фирмы "Дженерал Электрик" с относительным диаметром втулки  $\bar{d}_1 = 0,7$ ;

ступень II – пятая ступень натурального компрессора двигателя АИ-24 с  $\bar{d}_1 = 0,765$ ;

ступень III – последняя ступень натурального компрессора высокого давления с  $\bar{d}_1 = 0,917$ ;

ступень IV – типичная последняя ступень осевого компрессора с  $\bar{d}_1 = 0,875$ ;

ступени V и VI – первая и вторая ступени двухступенчатого экспериментального компрессора с  $\bar{d}_1 = 0,75$ .

Относительный радиальный зазор  $\bar{S}_{PK}$  по гладкой проточной части для этих ступеней находился в диапазоне от 0 до 1,6%.

Как видно из рис. I, а, надроторная область при наличии СВК характеризуется тремя радиальными ( $\varepsilon$ ,  $S_{PK}$ ,  $h_{СКВ}$ ) и тремя осевыми ( $l_{СКВ}$ ,  $t_{вх}$ ,  $t_{вых}$ ) геометрическими размерами. В дальнейшем удобно пользоваться относительными (отнесенными соответственно к высоте лопатки  $h_1$  и проекции хорды на периферии  $l_B$ ) геометрическими параметрами.

В основу анализа положены результаты опытного параметрического исследования ступени I /I/. При этом оценено влияние всех возможных соотношений геометрических параметров на  $\Delta \eta_{\text{эксп}}$  (экспериментальное изменение КПД при наличии СВК в сравнении с гладкой проточной частью, в процентах). Критерием сравнения являлось среднеквадратическое отклонение (СКО) для аппроксимирующих зависимостей (в первом приближении линейных)  $S_1$ , полученных методом наименьших квадратов. Для дальнейшего анализа отобраны шесть относительных геометрических параметров, имеющих минимальные СКО и представляющих все влияющие геометриче-

ские параметры, СКО одного из них ( $\bar{\varepsilon}$ ) оказалось в 4,3 раза меньше, чем ближайшее СКО из пяти других параметров. Следовательно, один из геометрических параметров (относительный эффективный радиальный зазор  $\bar{\varepsilon}$ ) является определяющим среди всех по влиянию на изменение КПД (рис. I, б).

Однако, помимо определяющего, на изменение КПД влияют и другие пять относительных геометрических параметров. Чтобы учесть их все в совокупности, использован метод группового учета аргументов (МГУА) на основе принципа самоорганизации /2/. В результате получен обобщающий геометрический параметр  $\Pi_1$ , объединяющий в структурной форме влияние шести характерных геометрических параметров на изменение КПД. Зависимость  $\Delta \bar{h}_{\text{экс}}$  от  $\Pi_1$  имеет СКО в 3,5 раза меньше, чем зависимость от  $\bar{\varepsilon}$  (рис. I, в), что показывает эффективность применения МГУА в данном обобщении. (Следует отметить, что в большинстве алгоритмов МГУА после переобозначения слагаемых получается линейный полином, т.е. коэффициент корреляции  $K_{\text{корр}}$  близок к единице).

Однако, обобщение результатов по СКВ нельзя ограничить влиянием только геометрических параметров, имеющихся в исследовании /1/. На следующем этапе в обобщение вошли данные по шести ступеням (рис. 2), в частности ряд точек из параметрического исследования /3/. Для оценки кинематики разных ступеней выбран фактор диффузорности в форме Либляйна  $D$  на периферии рабочей лопатки. По имеющимся данным получена зависимость  $\Delta \bar{h}_{\text{экс}} = f(D)$ . Совместное решение для полученной с помощью МГУА зависимости  $\Delta \bar{h}_{\text{экс}} = f(\Pi_1)$  в зависимости для кинематики позволило получить обобщающий геометро-кинематический параметр  $\Pi_2$ , использование которого привело к уменьшению СКО в сравнении с зависимостью для определяющего параметра  $\bar{\varepsilon}$  в 3,3 раза. Следует отметить, что при этом совмещались корреляционные функции, определяя погрешность обобщающей зависимости.

Наиболее эффективным оказалось применение МГУА одновременно для семи аргументов (шести геометрических и одного кинематического). В результате получен комплексный обобщающий параметр  $\Pi_3$ , представляющий собой расчетное изменение КПД  $\Delta \eta_{расч}$ . Зависимость  $\Delta \eta_{эксп}$  от параметра  $\Pi_3$  получилась из сравнения СКО в 20 раз точнее зависимости от одного определяющего параметра  $\bar{\epsilon}$ .

График на рис. 3 позволяет объяснить полученные ранее результаты: в подавляющем большинстве случаев СКВ прямоугольной формы МЕ приняты в таких областях по кинематике и сочетанию геометрических параметров, в которых результат по влиянию на КПД мог быть только отрицательным. Для получения положительного эффекта предпочтительны ступени с относительно низкой нагрузкой (величиной  $D$ ), в области малых значений  $\bar{\epsilon}$  при соответствующем оптимальном сочетании всех других геометрических параметров СКВ. В исследовании, проведенном в Харьковском авиационном институте ст.н.с. В.Г. Прокоповичем, КПД рабочего колеса экспериментальной ступени С-12 был повышен при использовании СКВ прямоугольной формы на 1,8% (при погрешности оценки  $\pm 0,3\%$ ). Расчетное повышение КПД по описанной методике составило 1,4% (точка, обозначенная крестиком на рис. 3).

Итак, предложенный метод обобщения позволил создать инженерную методику расчета изменения КПД при использовании надроторных устройств типа СКВ прямоугольной формы. Модификации разработанной методики могут обеспечить расчет изменения КПД при использовании и других типов надроторных устройств в компрессорных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.C. Wisler, B.F. Beacher. Improved Compressor Performance Using Recessed Clearance (Trenches). — J. Propulsion, July - August 1989, pp. 469-476
2. А.Г. Ивахненко, Ю.П. Брачковский. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. — М.: Радио и связь, 1987. — 120 с.
3. В.Ю. Незым, А.П. Ефименко, А.А. Никишов, В.Г. Прокопович. Опытная оценка влияния надроторных устройств типа СКВ на характеристики колеса компрессора. — Газовая динамика двигателей и их элементов, Харьков, ХАИ, 1987, с. 4-9.





