

УДК 621.515

С. С. ЕВГЕНЬЕВ, д-р техн. наук, проф.; проф. КНИТУ-КАИ, Казань, Россия;
В. А. ФУТИН, канд. техн. наук; с.н.с. КНИТУ-КАИ, Казань, Россия;
И. М. ШУБКИН, аспирант КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗА ПОЛУОТКРЫТЫМ РАБОЧИМ КОЛЕСОМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ ДИСКА И ПЕРЕТЕКАНИЕ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ КОРПУСОМ И ТОРЦАМИ ЛОПАТОК

На основе экспериментальных данных и расчетов с помощью метода конечно-объемных элементов по программе Flow Vision получены параметры за полуоткрытым рабочим колесом центробежной компрессорной ступени. Параметры рабочего колеса определены с учетом потерь на трение дисков и перетекания газа в межлопаточных каналах. Эти параметры влияют на эффективность рабочего колеса и являются граничными условиями при расчете осевых и радиальных сил. Уточнение этих параметров способствует повышению надежности и экономичности рабочего колеса. В данной работе для расчета относительных потерь на перетекание в зазорах между лопатками рабочего колеса и корпусом и на трение диска использованы обобщенные экспериментальные данные, учитывающие влияние фактических коэффициентов расхода ступени и реактивности рабочего колеса, геометрии бокового зазора между диском и корпусом, величины и направления расхода утечки около диска на его трение, а также влияние граничных условий за рабочим колесом в виде статического давления и закрутки потока непосредственно в боковом зазоре.

Ключевые слова: центробежный компрессор, полуоткрытое рабочее колесо, параметры за рабочим колесом.

Введение

Полуоткрытые рабочие колеса (РК) широко применяются в промышленных центробежных компрессорах и авиационных ГТД. Отсутствие покрывного диска и наличие зазора между корпусом и торцами лопаток полуоткрытого РК необходимо учитывать при расчете его характеристик. В связи с этим точное определение параметров РК с учетом потерь на трение дисков и перетекания газа в межлопаточных каналах, влияющих на эффективность колеса и являющихся граничными условиями при расчете осевых и радиальных сил, способствует повышению его надежности и экономичности, что является актуальным.

Анализ основных достижений и литературы

Обширные экспериментальные исследования течения воздуха в ступенях с полуоткрытым РК представлены в [1]. В этой работе показана физическая картина течения воздуха в полуоткрытом РК, на выходе из РК, безлопаточном и лопаточном диффузорах, работающих с РК. В данной работе для расчета относительных потерь на перетекание в зазорах между лопатками РК и корпусом $\beta_{пр}$ и на трение диска $\beta_{тр}$ использованы обобщенные экспериментальные данные из [2], учитывающие в отличие от известных работ [1, 3], влияние фактических коэффициентов расхода ступени Φ_0 и реакции РК Ω , геометрии бокового зазора между диском и корпусом, величины и направления расхода утечки около диска на его трение, а также влияние граничных условий за РК в виде статического давления и закрутки потока непосредственно в боковом зазоре.

Цель исследования, постановка задачи

Цель – определение параметров потока за полуоткрытым осерадиальным РК измерением, расчетом по известным газодинамическим характеристикам ступени

© С.С. Евгеньев, В.А. Футин, И.М. Шубкин, 2014

центробежного компрессора с использованием обобщенных литературных данных и численным расчетом по программе *Flow Vision*.

Материалы исследования

В качестве объекта исследования использована ступень центробежного компрессора, разработанная в ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», которая включала в себя: осевой входной патрубком; полуоткрытое осерадиальное РК, с углом установки лопаток на выходе $\beta_{л2} = 50^\circ$, наружным диаметром $D_2 = 300$ мм, относительной шириной РК на выходе $\bar{b}_2 = b_2/D_2 = 0,04$; лопаточный диффузор с углом лопатки на входе $\alpha_{л3} = 19^\circ$ и шириной $b_3 = b_4 = 1,25b_2$; выходное устройство в виде кольцевой камеры. Экспериментальные исследования проводились на воздухе при условном числе Маха $M_u = u_2/a_0 = 1$ (где u_2 – окружная скорость на РК на D_2 ; a_0 – скорость звука при входе в РК). Расчетный режим работы ступени соответствует условному коэффициенту расхода $\Phi_0 = 4V_0/(\pi D_2^2 u_2) = 0,058$ (где V_0 – объемный расход воздуха по условиям входа в РК).

При проведении эксперимента в ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» измерялись: статическое давление на входе в ступень p_0 ; температура на входе в ступень T_0 ; статическое давление на выходе из РК p_2 на диаметре $1,03D_2$; статическое давление на выходе из ступени p_k ; температура на выходе из ступени T_k . Производительность ступени определялась с помощью диафрагмы, установленной на линии нагнетания. По результатам экспериментальных данных получена характеристика ступени в виде зависимости коэффициента полезного действия и коэффициента напора от условного коэффициента расхода $\eta_{пол} = f(\Phi_0)$ и $\psi = f(\Phi_0)$.

Характеристику РК определяли по экспериментальной характеристике ступени. Для этого находили плотность на входе в ступень ρ_0 , далее задавали предварительное значение степени сжатия РК ε_2 и рассчитывали коэффициент расхода на выходе из РК φ_2 . Относительные потери на трение диска и перетечки в РК $\beta_{тр}$ и $\beta_{пр}$ находили с учетом обобщенных литературных данных по методике, представленной в [2]. После этого рассчитали теоретический коэффициент напора РК ψ_2 .

Далее по известным термодинамическим зависимостям из [4] определяли: степень реактивности РК Ω , температуру за РК T_2 , статическое давление за РК p_2 , плотность за РК ρ_2 , степень сжатия за РК ε_2 . Полученное значение ε_2 сравнивали с предварительным и уточняли весь расчет. Итерации проводили с точностью по ε_2 равной 10^{-4} . Таким образом, получали характеристику РК $\varphi_2 = f(\Phi_0)$ и $\psi_2 = f(\Phi_0)$.

Численное моделирование течения воздуха в проточной части центробежной ступени с полуоткрытым РК проводилось в программном комплексе *Flow Vision*. Расчет течения газа с помощью данного метода является физико-математическим представлением процесса и основан на численном решении системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу и описывающих динамику жидкости. Особенности применения *Flow Vision* для моделирования течения газа в турбомашинах рассмотрены в [5].

При численном моделировании рассматривалось осесимметричное течение воздуха в проточной части ступени, вследствие чего геометрическая модель

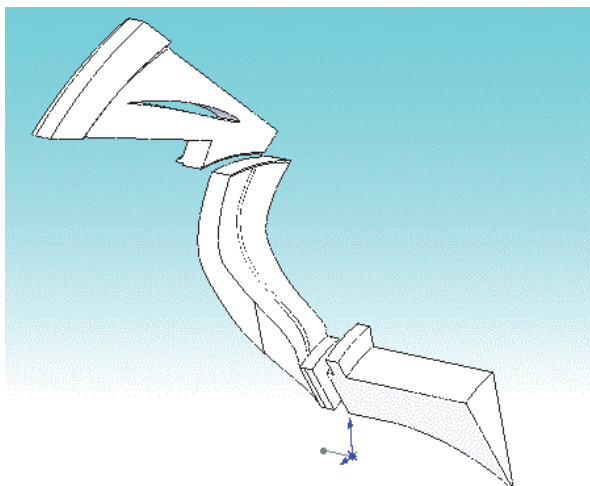


Рис. 1 – Геометрическая модель для численного моделирования

полные температуру и давление;

- на выходе из лопаточного диффузора задавали нормальную массовую скорость, определяемую как отношение заданного массового расхода воздуха m к площади выхода F_4 и к числу лопаток z_2 ;

- для неподвижных и вращающихся стенок задавали условие расчета пограничного слоя по логарифмическому закону; скорость на стенке при этом принималась равной нулю;

- подвижному элементу модели – рабочему колесу задавали движение вокруг оси z с частотой вращения $n = 21893$ об/мин, соответствующей частоте вращения реального РК центробежного компрессора;

- передача рассчитываемых данных от неподвижного входного аппарата к вращающемуся РК и далее к неподвижному лопаточному диффузору осуществлялась через связанные попарно между собой скользящие поверхности;

- для поверхностей, выделяющих осесимметричный сектор, задавали условие периодичности.

После проведения расчета с использованием средств постпроцессора программы *Flow Vision*, позволяющих проводить осреднение по площади и по расходу, определяли все необходимые термо- и газодинамические параметры в контрольных сечениях: на входе в РК и на выходе из РК.

Результаты исследования

В результате определены параметры за полуоткрытым рабочим колесом в виде зависимости относительного перепада статического давления от условного коэффициента расхода $(\bar{p}_2 - \bar{p}_0) = f(\Phi_0)$ тремя методами (см. рис. 2).

Первый метод основан на известной экспериментальной характеристике ступени с измерением статических давлений за рабочим колесом. *Во втором методе* параметры за рабочим колесом определены из суммарной экспериментальной характеристики ступени с учетом обобщения литературных данных по относительным потерям на перетекание и трение диска рабочего колеса. *Третий метод* заключается в определении параметров за рабочим колесом и всей характеристики ступени на основе численного моделирования течения газа на программе *Flow Vision*.

Из рис. 2 видно, что отличие измеренного (кривая 1) и рассчитанного (кривая 3) относительного перепада статического давления составляет (5–6) %, что обусловлено

представляет сектор с одной лопаткой РК и содержит три подобласти: входной аппарат, РК и лопаточный диффузор (см. рис. 1). Зазор между торцами лопаток РК и стенкой корпуса δ задан аналогично фактическому зазору, возникающему при работе центробежной ступени, и составляет 0,4 мм.

В результате численного моделирования в программном комплексе *Flow Vision* получали все необходимые параметры за рабочим колесом.

В расчетной модели были приняты следующие граничные условия:

- на входе в ступень задавали

различными диаметрами отбора давления. Измерения проводились на диаметре $1,03D_2$. Расчетные данные определены на диаметре D_2 .

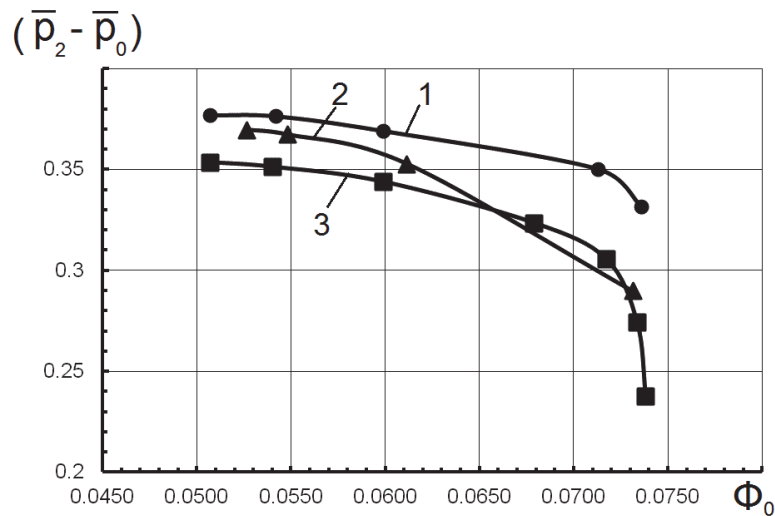


Рис. 2 – Зависимость $(\bar{p}_2 - \bar{p}_0) = f(\Phi_0)$:

1 – измерение за РК; 2 – результат численного моделирования;
3 – расчет по суммарной экспериментальной характеристике ступени с учетом обобщения литературных данных по относительным потерям на перетекание и трение диска рабочего колеса

Выводы

В статье получены параметры за РК тремя различными методами. Результаты расчетов и измерений хорошо согласуются между собой, что позволяет применять представленные расчетные методы при проектировании центробежных ступеней с полуоткрытыми осерадиальными РК.

Список литературы: 1. *Виноградов, Б. С.* Исследование рабочего процесса и характеристик центробежных компрессоров [Текст] / Б. С. Виноградов, В. А. Красильников, Н. А. Алемасова, А. Л. Новиков // Труды КАИ. – Казань, 1960. – № 56. – 157 с. 2. *Евгеньев, С. С.* Расчет осевых газодинамических сил, потерь на трение диска и перетекания в полуоткрытых рабочих колесах центробежных компрессоров [Текст] / С. С. Евгеньев, Г. Г. Петросян, В. А. Футин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – Казань, 2009. – № 3. – С. 39–43. 3. *Ржавин, Ю. А.* Осевые центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет [Текст]: учеб. / Ю. А. Ржавин. – М.: Изд-во МАИ, 1995. – 344 с. 4. *Ден, Г. Н.* Механика потока в центробежных компрессорах [Текст] / Г. Н. Ден. – Л.: Машиностроение, 1973. – 272 с. 5. *Хисамеев, И. Г.* Проведение верификации моделей проточной части турбомашин на программе Flow Vision [Текст] / И. Г. Хисамеев, В. А. Футин, И. М. Шубкин // Вестник КГТУ. – Казань, 2011. – № 22. – С. 106–110.

Bibliography (transliterated): 1. Vinogradov, B. S., et al. "Issledovanie rabocheho processa i harakteristik centrobezhnyh kompressorov." *Trudy KAI*. No. 56. Kazan, 1960. Print. 2. Evgen'ev, S. S., G. G. Petrosjan and V. A. Futin. "Raschet osevyh gazodinamicheskikh sil, poter' na trenie diska i peretekaniya v poluotkrytyh rabochih kolesah centrobezhnyh kompressorov." *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaja tehnika*. 3 (2009): 39–43. Print. 3. Rzhavin, Ju. A. *Osevyje centrobezhnye kompressory dvigatelej letatel'nyh apparatov. Teorija, konstrukcija i raschet*. Moscow: Izd-vo MAI, 1995. Print. 4. Den, G. N. *Mehanika potoka v centrobezhnyh kompressorah*. Leningrad: Mashinostroenie, 1973. Print. 5. Hisameev, I. G., V. A. Futin and I. M. Shubkin. "Provedenie verifikacii modelej protochnoj chasti turbomashiny na programme Flow Vision." *Vestnik KGTU*. No. 22. Kazan, 2011. 106–110. Print

Поступила (received) 23.02.2014