

СТРУКТУРА ПОТОКА В ОСЕРАДИАЛЬНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОЛЕСЕ

Рассмотрены экспериментальные данные по замерам полей скоростей и давлений в осерадиальных высоконапорных рабочих колесах центробежных компрессоров. Показано, что распределение реальных скоростей существенно отличается от идеального, а распределение давлений практически совпадает. Установлено сильное влияние геометрии на структуру потока. Определены предпосылки для разработки методики профилирования проточной части рабочих колес.

E-mail: Kuftov_a@mail.ru; hros@mail.ru

Ключевые слова: центробежный компрессор, рабочее колесо, структура потока.

Осерадиальные центробежные ступени получили широкое применение в авиации как основные компрессоры для малорасходных двигателей и как концевые ступени осерадиальных компрессоров двигателей средней мощности. Степень повышения давления в таких ступенях лежит в диапазоне значений $\pi_k^* = 2,5 \dots 12$, изоэнтропический КПД $0,75 \dots 0,84$, угол выхода лопатки рабочих колес $\beta_{2л} = 50 \dots 90^\circ$, коэффициент теоретического напора $\bar{H}_T = H_T / u_2^2 = 0,85 \dots 0,93$, т. е. они относятся к высоконапорным. Здесь u_2 — окружная скорость на выходе из колеса. Радиальная часть рабочих колес (РК) и лопатки диффузоров представляют собой решетки с малым удлинением, соответственно течение в них происходит в условиях сомкнувшихся пограничных слоев и при наличии интенсивных вторичных течений. Кроме того, поток в каналах РК зависит от массовых сил — центробежных и кориолисовых, влияющих как на осредненные, так и на локальные характеристики течения, в первую очередь на коэффициенты турбулентного обмена.

Поток в проточной части турбомашин, будь то осевая или центробежная, можно рассчитать с помощью уравнения Навье — Стокса. Ввиду того, что сложно найти решение для реальных течений, его используют в упрощенном виде, таком, как уравнение Бернулли, Эйлера, Навье — Стокса в форме Рейнольдса. В каждом конкретном случае следует обосновывать выбор того или иного способа расчета, для чего, в свою очередь, необходимо хорошо представлять картину течения в межлопаточных каналах турбомашин. Информация о

структуре течения должна послужить основой для разработки эффективных методов профилирования.

Для этих целей были рассмотрены результаты экспериментов различных авторов по замерам полей скоростей и давлений в межлопаточных каналах осерадиальных РК центробежных компрессоров в широком диапазоне значений коэффициентов напора.

В насосных ступенях подобные исследования начали проводить раньше, чем в компрессорных. Шпанхаке еще в начале 1930-х годов отметил, что в межлопаточных каналах радиального насоса имеют место вторичные течения, направленные по дискам от стороны давления к стороне разрежения и в обратном направлении в ядре потока. При исследованиях внутри колеса использовали инерционные датчики типа многоканальных зондов, сигнал от которых через датчики давления передавался на неподвижные вторичные приборы или на вторичные приборы, вращающиеся вместе с колесом. Получение более полной картины течения в настоящее время возможно лазер-доплеровским методом.

Первым подробным экспериментом в компрессорном осерадиальном центробежном колесе с использованием инерционных насадков можно считать эксперимент Х.С. Фоулера (1974). Модель РК имела наружный диаметр $D_2 = 2$ м, частоту вращения $n = 50 \text{ мин}^{-1}$, объемный расход $V = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$, число Рейнольдса по u_2 $Re_{u_2} = 2,7 \cdot 10^6$. Оператор вынужден был вращаться вместе с колесом, так как отсутствовал передатчик давления на вторичные приборы.

Данные, полученные в ходе замеров, представлены на рис. 1, на котором видно, что скорости идеальной и реальной жидкости в межлопаточных каналах осерадиальных колес сильно различаются между собой. Сравнивая результаты расчетов и эксперимента в разных сечениях, можно проследить влияние вязкости на распределение скоростей и выявить зону межлопаточного канала, в которой начинаются процессы, приводящие к перестройке потока.

В угловой зоне между сторонами разрежения и периферийного сечения лопатки находится зона пониженных скоростей, которая позже на выходе из колеса была названа Динном зоной следа. В данном случае эта зона начинается с косога среза на входе, на стороне разрежения, т. е. практически с сечения 1. Можно предположить, что столь ранние проявления торможения скорости происходит из-за неудачного выбора конфигурации заборного устройства (ЗУ). Как видно на эпюрах скоростей, зона пониженных скоростей, увеличиваясь в размерах, доходит до выхода из межлопаточного канала колеса.

Из экспериментов Х.С. Фоулера осталось неясным, какова причина перестройки поля скоростей от лопатки к лопатке по сравнению с распределением скоростей в идеальной жидкости. Для выявления причины перестройки реального потока в сопоставлении с

идеальным в МГТУ им. Н.Э. Баумана были проведены эксперименты на крупномасштабном стенде при следующих параметрах РК: $D_2 = 0,8$ м, высота лопатки на выходе $h_2 = 0,04$ м, $n = 950$ мин⁻¹, массовый расход $G = 2,9$ кг/с, $Re_{u_2} = 2,7 \cdot 10^6$, относительный диаметр колеса $\bar{D} = D_{1п} / D_2 = 0,55$, относительный диаметр входа $\bar{d} = D_{1вт} / D_{1п} = 0,5$. Здесь $D_{1п}$ и $D_{1вт}$ — диаметры колеса на входе периферии и втулки соответственно. Замеры проводили пятиточечным насадком, что позволяло определить вектор скорости. Сигнал от первичных приборов на вторичные передавался через передатчик давления. Исследованы два варианта меридионального контура (рис. 2). Для каждого контура были испытаны колеса с профилированием типа “радиальная звезда”, как у Фоулера; и с профилированием по гидродинамически целесообразному распределению нагрузки (ГЦРН), полученному из обобщения опытных данных существующих конструкций [1, 2].

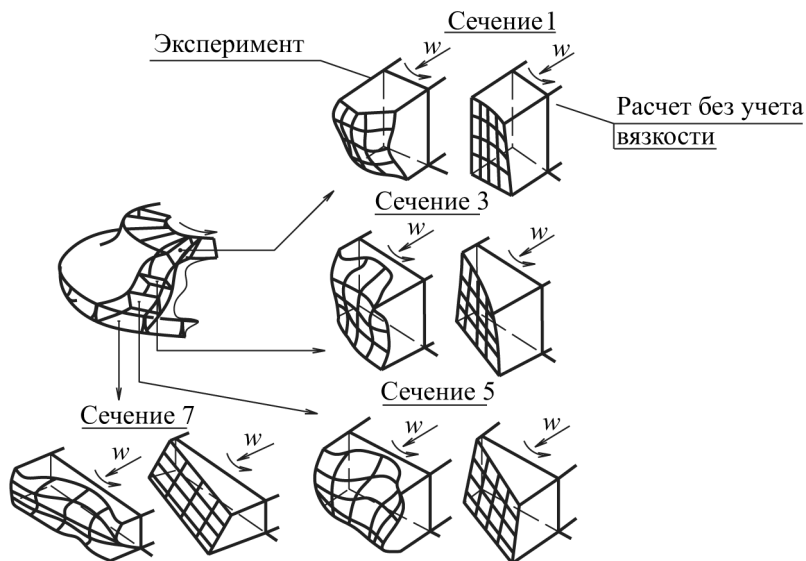


Рис. 1. Пространственная эпюра относительных скоростей в канале рабочего колеса по данным Фоулера:

w — относительная скорость

Замеры параметров потока проводили в сечениях, показанных на рис. 2, результаты измерений относительной скорости на выходе из колеса представлены на рис. 3.

Прежде всего стоит отметить, что было получено аналогичное различие в распределении скоростей идеальной и реальной жидкости, как и в экспериментах Х.С. Фоулера, только в колесах, исследованных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЗУ спрофилировано с гарантиро-

ванным безотрывным течением на периферийном сечении. В результате этого в осевой части колеса значения скоростей, полученные в ходе эксперимента, ближе к расчетным, что подобно поведению жидкости в межлопаточном пространстве осевой машины, где можно выделить ядро потока и пограничный слой. Соответственно зона отрыва пограничного слоя начиналась за поворотом от осевого направления к радиальному (см. рис. 2). После поворота потока скорости на поверхностях лопатки в реальном течении почти равны, а исходя из расчетов идеальной жидкости, должен наблюдаться перекося, выражаемый в увеличении скорости от стороны давления к стороне разрежения. К выходу это различие становится максимальным.

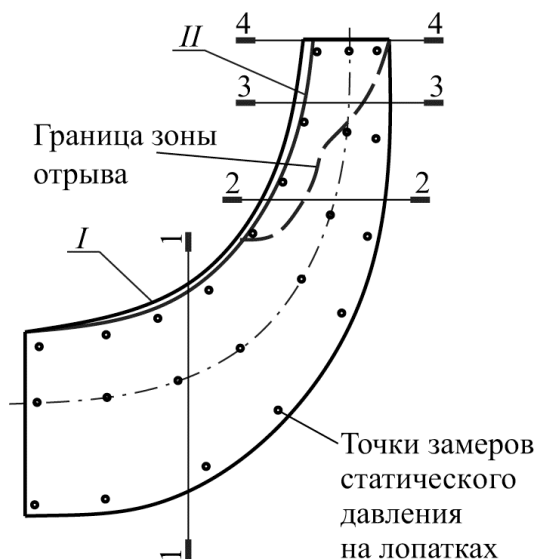


Рис. 2. Меридиональные контуры РК I и II, испытанных в МВТУ им. Н.Э. Баумана

В результате того что проведены более подробные измерения скоростей в канале колеса, стала понятна причина выравнивания поля скоростей от лопатки к лопатке, которая кроется в сильных вторичных течениях. Они движутся по ограничивающим стенкам от стороны давления к стороне разрежения, и далее по условию неразрывности происходит возврат в области середины канала с образованием парного вихря. Его интенсивность зависит от способа профилирования, что видно при сравнении замеров при использовании лопатки типа “радиальная звезда” (рис. 4, а) и профилирования по ГЦРН (рис. 4, б). Для корректности сравнения структуры потока при разном профилировании в обоих случаях были одинаковыми меридиональный контур, частота вращения, а также $\beta = \text{idem}$ на входе и выходе из колеса. В результате наложения вторичных течений на транзитный поток получается сложное винтовое течение, которое

можно характеризовать параметром $S = w_u / w_m$ [3], где w_u — окружающая составляющая окружной скорости.

Проектирование лопатки по ГЦРН дает меньшую интенсивность парного вихря, и его форма получается более симметричной. Помимо крупных вихрей в том и другом случаях образуется ряд мелких вихрей, но в варианте с ГЦРН их интенсивность меньше. Также следует отметить, что при сравнении двух вариантов профилирования (см. рис. 3) видно, что при ГЦРН зона пониженных скоростей уже и позже начинает свое развитие.

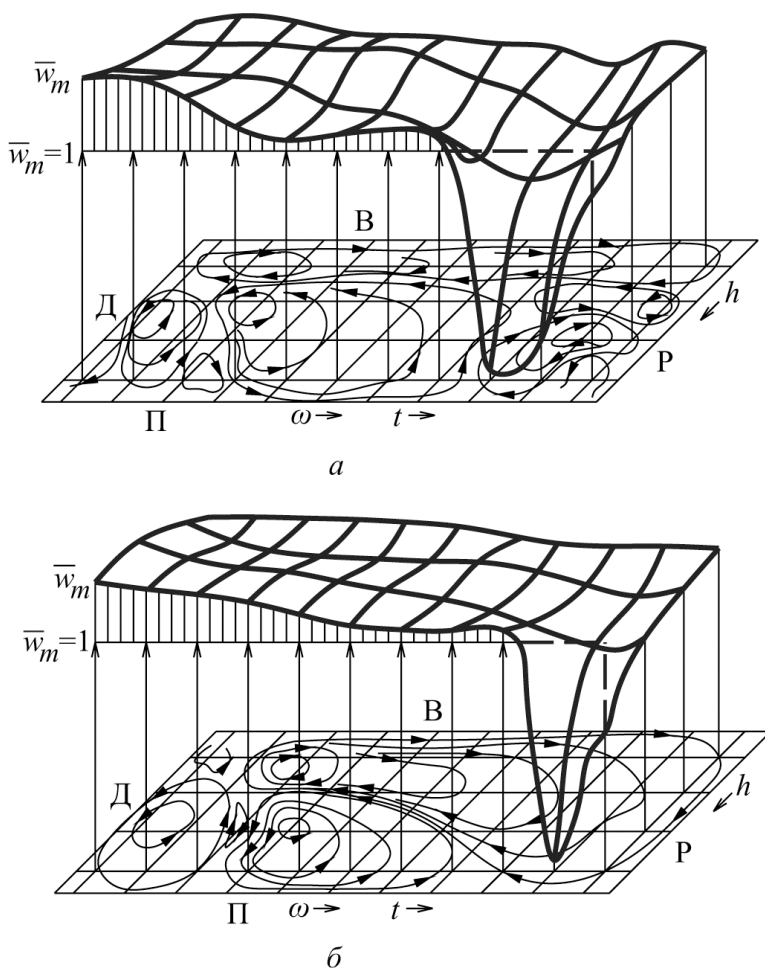
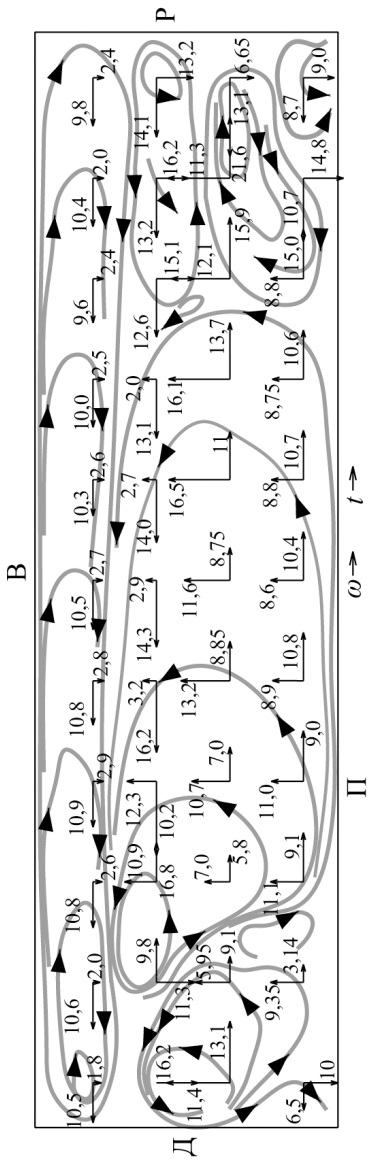
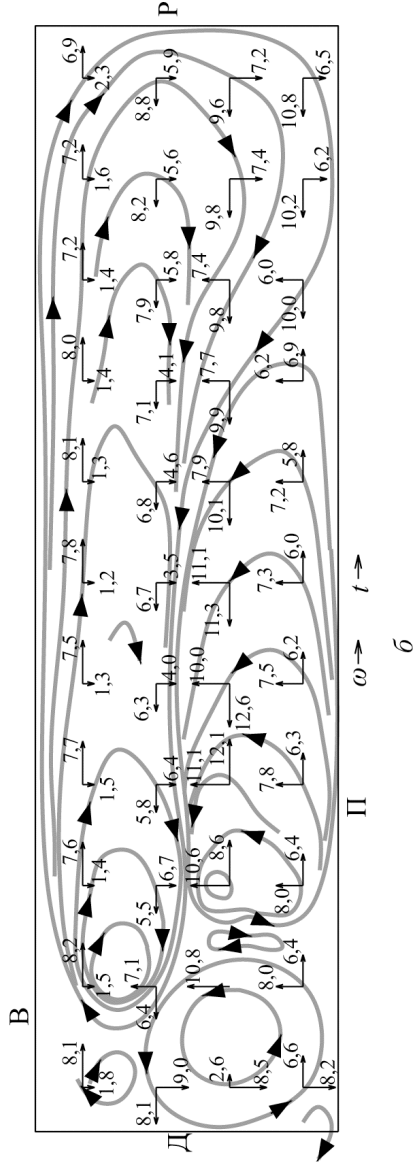


Рис. 3. Пространственные эпюры безразмерных меридиональных скоростей $\bar{w}_m = w_m / w_{ср2}$ на выходе из колеса (меридиональный контур I ; $w_{ср2}$ — среднерасходная скорость на выходе из колеса):

a — вариант с профилированием типа “радиальная звезда”; *б* — вариант с профилированием по ГЦРН; t — шаг решетки; h — высота лопатки; Π — периферийное сечение; B — втулочное сечение; D — сторона давления; P — сторона разрежения; ω — направление вращения колеса



a



б

Рис. 4. Вторичные течения на выходе из колеса. Меридиональный контур I

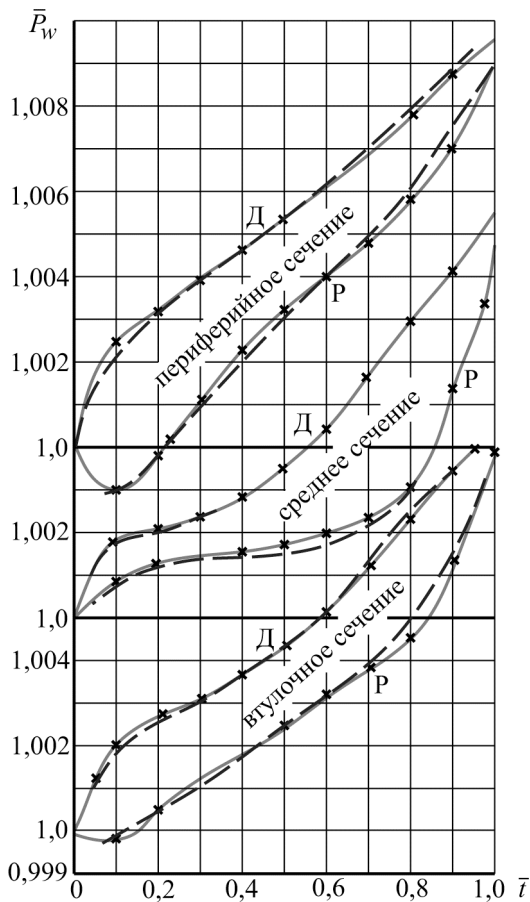


Рис. 5. Распределение безразмерного статического давления в относительном движении $\bar{P}_0^* = P_w / P_0^*$ по поверхности лопатки на трех осесимметричных сечениях (вариант профилирования по ГЦРН; меридиональный контур II. P_0^* — полное давление на входе в компрессор)

Помимо скоростей в МГТУ им. Н.Э. Баумана замеряли статическое давление по трем осесимметричным сечениям на сторонах давления и разрежения (см. рис. 2). В отличие от скоростей, распределение статических давлений по лопатке, полученных из расчета, хорошо согласуется с замеренными распределениями давлений (рис. 5). Подобные результаты опубликованы и другими исследователями, например И. Ватанабе [4]. Причем, чем выше КПД колеса, тем ближе значения расчетных и замеренных давлений, в том числе и на переменных режимах.

Эксперимент, проведенный в МГТУ им. Н.Э. Баумана по замерам полного давления в РК, показал, что наибольшие значения потерь сосредоточены в зоне следа (рис. 6). При традиционном профилировании зона следа зависит от угла выхода лопатки (рис. 7), поэтому в

колесах с малым значением $\beta_{2л}$ КПД всегда выше. Существует возможность уменьшения или ликвидации зоны следа [5], что приведет к увеличению КПД и снижению виброактивности.

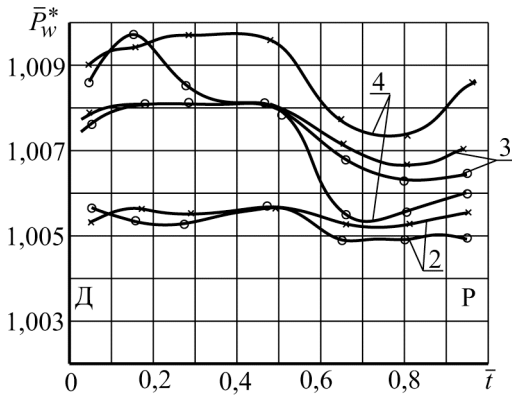


Рис. 6. Распределение безразмерного давления торможения в относительном движении $\bar{P}_0^* = P_w / P_0^*$ по шагу (периферийное сечение; меридиональный контур Π):

○ — вариант с профилированием типа “радиальная звезда”; * — вариант с профилированием по ГЦРН

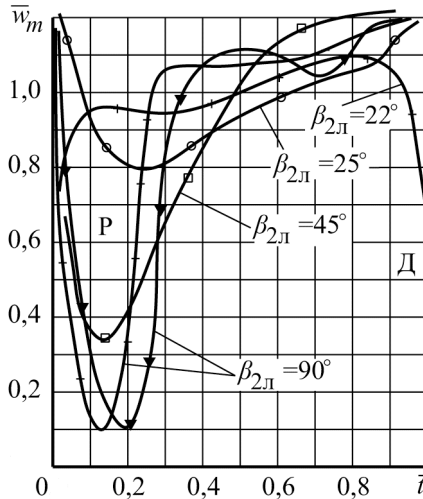


Рис. 7. Распределение безразмерной скорости $\bar{w}_m = w_m / w_{ср2}$ на выходе из колеса в диапазоне значений $\beta_{2л} = 25...60^\circ$ по данным разных авторов:

$\bar{t} = t / t_2$ — безразмерный шаг решетки; t_2 — шаг между лопатками на выходе из колеса

Одновременно и независимо в 1974–1976 гг. Д. Экард проводил аналогичные исследования в колесе типа “радиальная звезда” с помощью лазер-доплеровского метода [6], что позволило оценить осредненные и локальные параметры потока, такие, как пульсации скоростей и давлений. Параметры исследуемого колеса в расчетной точке: $D_2 = 0,4 \text{ м}$; $n = 18\,000 \text{ мин}^{-1}$; $\pi_{\kappa}^* = 3,0$; $G = 7,2 \text{ кг/с}$. Несмотря на различие в параметрах ступени эпюры скоростей качественно совпадают с эпюрами, полученными в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также замеры полных давлений подтверждают эти данные. Помимо этого опыты Д. Экарда показали наличие интенсивных пульсаций полного давления в зоне пониженных скоростей, причем наибольшие — в зоне следа на выходе из колеса (рис. 8).

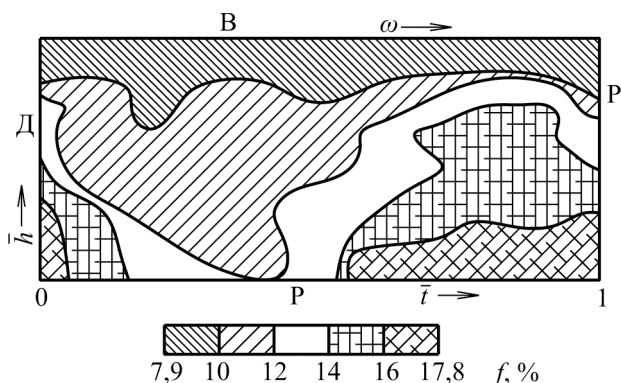


Рис. 8. Распределение коэффициента пульсации полного давления на выходе из межлопаточного канала колеса по данным Д. Экарда:

$f = \sqrt{(P_i^* - P_{cp}^*)^2} / P_{cp}^* \times 100 \%$, где P_i^* , P_{cp}^* — полное и среднее давления в локальной точке на плоскости замера соответственно

В дальнейшем аналогичные исследования были продолжены Н. Крейном в 1985–86 гг. Сравнение с результатами Экарда выполнены Н. Кампти [7]. Отличие в геометрии колес в сопоставлении с конструкциями Х.С. Фоулера, Д. Экарда, МГТУ им. Н.Э. Баумана (профили типа “радиальная звезда”) и И. Ватанабе было отмечено в конфигурации как меридионального контура, так и формы лопатки (S-образный профиль). Колесо Крейна по форме профиля ближе к варианту профилирования ГЦРН МГТУ им. Н.Э. Баумана. Х. Крейну удалось спроектировать колесо, в межлопаточных каналах которого зона следа отсутствовала, а пространственная эпюра скоростей оказалась ближе к расчетной. Эффективность этого колеса также выше, чем колес с радиальными лопатками, и близка к эффективности колеса, созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана с ГЦРН-профилированием.

Для разработки эффективных методов расчета и проектирования РК ЦБК были проанализированы эксперименты по определению полей скоростей в относительном движении и давлений в межлопаточных каналах РК. Исследования проведены как с помощью пневмозондов, так и с помощью лазер-доплеровских методов, что позволяло получить осредненные и локальные характеристики.

Эксперименты показали, что реальное распределение скоростей в осерадиальных высоконапорных колесах принципиально отличается от идеального, в то время как распределение статических давлений по лопаткам практически совпадает с идеальным. Выявлено, что изменение геометрии существенно влияет на структуру потока и позволяет значительно уменьшить или ликвидировать зону следа на выходе из колеса, повышая эффективность ступени в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекнев В.С., Куфтов А.Ф. Проектирование решеток рабочих колес центробежных компрессоров с использованием коэффициентов аэродинамической нагрузки // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 1975. № 11. С. 111–113.
2. Generalized parameters for radial compressors, fans and pumps / V.S. Beknev, S.E. Vasilenko, A.F. Kooftev, R.Z. Tumashev // 3rd Int. Symp. on Aerothermodynamics of Internal Flows. 1996. Beijing, China. P. 419–427.
3. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. Торнадо. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 344 с.
4. Мицуки Ш., Арига И., Ватанабе И. Исследование нагруженности лопаток рабочих колес центробежных компрессоров // Пер. ВЦП № Ц-46986. М., 1975. 47 с.
5. Куфтов А.Ф., Сыроквашо А.В. Профилирование проточной части рабочих колес осерадиальных компрессоров // Авиационная техника. 2010. № 4. С. 35–38.
6. Экард Д. Мгновенные измерения в выходящем из рабочего колеса центробежного компрессора потоке типа “струя — след” // ЭМУ. 1974. № 3. С. 38–49.
7. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров: пер. с англ. М.: Мир, 2000. 688 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012