

На правах рукописи

Ноткина Ирина Михайловна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗЛОПАТОЧНЫХ ДИФФУЗОРОВ
МАЛОРАСХОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ
СТУПЕНЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОГО ВЯЗКОГО
ПОТОКА**

Специальность 05.04.06 - Вакуумная, компрессорная
техника и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое применение центробежных компрессоров (ЦК) в химической, нефтяной и газовой промышленности при осуществлении традиционных и перспективных технологических процессов, в которых сжатие газов происходит при высоких плотностях и давлениях сред в компрессорах малой объемной производительности, сопряжено с требованиями постоянного совершенствования их технико-экономических показателей и надежности. Проточные части центробежных компрессоров высокого и сверхвысокого давления построены на малорасходных ступенях с безлопаточными диффузорами (БЛД). Ступени с БЛД позволяют повысить надежность работы компрессора из-за снижения уровня динамических напряжений в лопаточных элементах и обеспечить широкую зону устойчивой работы компрессора. В то же время трудоемкость и постоянное удорожание экспериментальных исследований на уникальном оборудовании вызывает необходимость разработки теоретических методов анализа как основы совершенствования элементов проточной части. Таким образом, тема настоящего исследования, направленная на совершенствование безлопаточных диффузоров малорасходных ступеней на основе теоретического анализа вязкого потока, является актуальной научно-технической задачей.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является разработка метода анализа трехмерного турбулентного потока в безлопаточном диффузоре произвольной формы, его апробация и исследования на основе разработанного метода влияния геометрических и режимных параметров на течение и энергетические характеристики БЛД малорасходных ступеней с целью разработки рекомендаций по повышению их эффективности.

В соответствии с целью были определены следующие задачи исследования:

1. Разработать методику расчета течения трехмерного сжимаемого турбулентного потока в БЛД произвольной формы малорасходной ступени ЦК, работающего на различных режимах углов потока в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса.
2. Выполнить апробацию методики путем сравнения результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными.
3. Провести численное исследование влияния b_3/b_2 , D_4/D_2 , α_2 , M_u , Re_u при различной шероховатости механически обработанных поверхностей h на течение и энергетические характеристики БЛД малорасходной ступени с $\Phi_p = 0,011$.
4. Разработать рекомендации по повышению эффективности работы безлопаточных диффузоров малорасходных ступеней ЦК.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика анализа трехмерного вязкого сжимаемого потока в безлопаточных диффузорах произвольной геометрической формы на основе решения полных уравнений Навье-Стокса методом контрольного объема, учитывающая неравномерность параметров потока по шагу на выходе из межлопаточных каналов рабоче-

го колеса (РК), протечки и перетечки в области входа в диффузор, положительный градиент давления, топоологию шероховатости механически обработанных стенок БЛД, повышенную турбулентность втекающего потока в БЛД и позволяющая исследовать параметры потока и энергетические характеристики диффузоров во всем диапазоне работы ступени;

- на основе численного исследования влияния геометрических (b_3/b_2 , D_4/D_2) и режимных (α_2 , Re_u , M_u) параметров для малорасходной ступени ($\Phi_p=0,011$) разработанным методом показана возможность эффективной работы БЛД с $1,0 < b_4/b_2 < 1,35$ без образования пространственного отрыва потока при $\alpha_2 \geq (7...9)^\circ$ в широком диапазоне чисел Маха ($M_u=0,56...0,87$), Рейнольдса ($Re_u=1,5 \cdot 10^5...5 \cdot 10^6$) и относительной шероховатости стенок ($\bar{h}=h/(2b_3)=(2...5) \cdot 10^{-4}$).

Практическая ценность работы. Созданная практическая методика расчета и программное обеспечение на ПЭВМ позволяют на стадии проектирования оценить и сопоставить эффективность и зону устойчивой работы БЛД при окончательном выборе его формы для малорасходных ступеней с $\Phi_p=0,005...0,03$. По результатам вычислительного эксперимента рекомендованы геометрические размеры и форма профилированного БЛД повышенной эффективности, обеспечивающего запас работы до неустойчивых режимов до 50% для малорасходной ступени с $\Phi_p=0,011$.

Результаты исследования использовались в ходе совместной работы между Российским фондом фундаментальных исследований и Немецким научно-исследовательским обществом (проекты № 96-01-00091-а и 01-01-04001-а), а также в рамках сотрудничества с Чешским научным обществом (грант Агентства Чешской республики № 101/02/0364).

Достоверность полученных результатов достигается подробной апробацией разработанного специализированного метода анализа вязкого течения в БЛД малорасходных ступеней сравнением расчетных и известных экспериментальных данных.

Апробация работы. Материалы исследования по теме диссертации докладывались и обсуждались на XI и XII Международных научно-технических конференциях по компрессорной технике (Казань, 1998, 2001), 5-м Международном Симпозиуме по экспериментальной и вычислительной аэротермодинамике внутренних течений (Гданьск, Польша, 2001), 5-ой Европейской конференции по турбомашинам (Прага, Чехия, 2003), на научно-технических конференциях в СПбГПУ (2002) и НИИТурбокомпрессор (Казань, 2002).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 147 страницах текста, содержит 88 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 105 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, обоснована необходимость разработки и применения методов анализа трехмерного вязкого потока в проточных частях ЦК, сформулирована цель работы и приведены основные результаты.

В первой главе приведены экспериментальные исследования влияния ряда геометрических и режимных параметров на течение и эффективность БЛД и ступеней ЦК различной расходности, выполненные в работах Ю.Б. Галеркина, Г.Н. Дена, Р.А. Измайлова, Ю.Б. Ладе, С.В. Кононова, В.А. Кулагина, А.С. Нуждина, Н.И. Садовского, Л.Я. Стрижака и др. Обзор расчетно-теоретических исследований, посвященных анализу трехмерного вязкого потока в ступенях ЦК на основе полных уравнений Навье-Стокса с целью повышения эффективности проточной части, показал, что применение универсальных коммерческих пакетов программ для расчета течений в проточной части ступени ЦК не всегда дает удовлетворительные результаты. Целям проектирования больше соответствуют специализированные программы, учитывающие особенности течения в БЛД малорасходных ступеней ЦК.

В настоящее время не существует однозначных рекомендаций по проектированию высокоэффективных проточных частей малорасходных ступеней с БЛД, а рекомендации, полученные при исследовании БЛД ступеней ЦК средней и большой расходности, не могут быть распространены на малорасходные ступени без дополнительных исследований. На основании проведенного анализа определены задачи расчетно-теоретического исследования.

Во второй главе изложена методика расчета трехмерного турбулентного вязкого потока в БЛД ступени ЦК. Для расчета потока неравномерного по шагу межлопаточного канала РК используются осредненные по времени уравнения Навье-Стокса во вращающейся вместе с РК с угловой скоростью $\bar{\omega}$ системе координат. При рассмотрении течений в БЛД произвольной формы исходные уравнения в безразмерном виде, записанные в декартовой системе координат (x_1, x_2, x_3) , преобразуются в пространстве обобщенных криволинейных координат (ξ_1, ξ_2, ξ_3) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{m=1}^3 \frac{\partial (G_m)}{\partial \xi_m} = 0, \quad G_m = \rho \sum_{k=1}^3 S_k^{(m)} w_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho w_n)}{\partial t} + \sum_{m=1}^3 \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left(G_m w_n + S_n^{(m)} p^* - \sum_{k=1}^3 S_k^{(m)} \frac{\tau_{kn}}{Re_u} \right) = \frac{\rho}{J} \begin{cases} (\rho - \rho_h) \omega^2 x_1 / \rho + 2\omega w_2, & n=1 \\ (\rho - \rho_h) \omega^2 x_2 / \rho - 2\omega w_1, & n=2, \\ 0, & n=3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} - (k-1) M_u^2 \frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{m=1}^3 \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left(G_m I + \frac{1}{Pr_2 Re_u} \sum_{k=1}^3 S_k^{(m)} q_k - \frac{k-1}{Re_u} M_u^2 \sum_{k=1}^3 w_k \sum_{p=1}^3 S_p^{(m)} \tau_{pk} \right) = 0 \quad (3)$$

Здесь ρ - плотность, t - время, w_k - компоненты вектора скорости \vec{W} в относительной системе координат, $W^2 = |\vec{W}|^2$, τ_{kn} - компоненты тензора вязких напряжений,

q_k - компоненты вектора теплового потока, $I=c_p T+(k-1)M_u^2(W^2-u^2)/2$ - ротальпия, c_p - коэффициент удельной теплоемкости при постоянном давлении, T - температура, $u=\sqrt{|\vec{\omega}\times\vec{r}|^2}$ - переносная скорость; $Re_u=2b_2u_2\rho_2/\mu_2$, $M_u=u_2/\sqrt{kRT_2}$ - условные числа Рейнольдса и Маха, составленные по параметрам потока на выходе из РК, $Pr_2=\mu_2c_{p2}/\lambda_2$, $k=c_p/(c_p-R)$, R - газовая постоянная; J - Якобиан преобразования координат, $S_k^{(m)}=\partial\xi_m/(J\partial x_k)$ - компоненты вектора $\vec{S}^{(m)}$, перпендикулярного к поверхности контрольного объема $\xi_m=\text{const}$; $p^*=p-p_{\text{вых}}-p_h$ - модифицированное давление, которое вводится для улучшения процесса сходимости, p - статическое давление, $p_{\text{вых}}$ - статическое давление на одной из стенок в выходном сечении БЛД, p_h - гидростатическое давление, связанное с гидростатической плотностью ρ_h условиями гидростатического и изоэнтропического равновесия: $\vec{\nabla}p_h=\rho_h\vec{\nabla}\omega^2\tilde{r}^2/2$, $p_h/\rho_h^k=\text{const}$, \tilde{r} - радиус-вектор точки от оси вращения. Уравнение состояния: $\rho T=(p^*+p_h)\cdot kM_u^2$.

Для замыкания системы основных уравнений (1) – (3) используется пространственная анизотропная модель турбулентного обмена Н.И. Булеева:

$$\tau_{kn}=\rho\varepsilon_{kk}^M\frac{\partial w_n}{\partial x_k}+\rho\varepsilon_{nn}^M\frac{\partial w_k}{\partial x_n}-\frac{c_0^2}{3}\delta_{kn}\rho\varepsilon_{kn}^M\left|\frac{\partial W}{\partial n}\right|, \quad k,n=1,2,3 \quad (4)$$

$$q_k=c_p\varepsilon_{kk}^H\frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k=1,2,3, \quad (5)$$

где ε_{kn}^M и ε_{kn}^H - коэффициенты турбулентной диффузии количества движения и тепла, $c_0=1,25$ - эмпирическая константа, $|\partial W/\partial n|$ - модуль деформации поля скорости усредненного движения;

$$\left|\frac{\partial W}{\partial n}\right|^2=2\left(\frac{\partial w_1}{\partial x_1}\right)^2+2\left(\frac{\partial w_2}{\partial x_2}\right)^2+2\left(\frac{\partial w_3}{\partial x_3}\right)^2+\left(\frac{\partial w_2}{\partial x_3}+\frac{\partial w_3}{\partial x_2}\right)^2+\left(\frac{\partial w_3}{\partial x_1}+\frac{\partial w_1}{\partial x_3}\right)^2+\left(\frac{\partial w_1}{\partial x_2}+\frac{\partial w_2}{\partial x_1}\right)^2. \quad (6)$$

Для учета пристенного и струйного характера турбулентности в БЛД коэффициенты турбулентной диффузии количества движения и тепла в направлении, перпендикулярном стенке диффузора, определяются локальными аппроксимациями, предложенными Н.И. Булеевым:

$$\varepsilon_{33}^M=c_1f_0(\eta)f_1(\eta)L^2|\partial W/\partial n|, \quad \eta=c_2/\gamma^*, \quad \gamma^*=L^2|\partial W/\partial n|/\nu \quad (7)$$

$$\varepsilon_{33}^H=c_1f_0(\eta)f_1(\lambda\eta)L^2|\partial W/\partial n|, \quad \lambda=0,8+0,2(\tilde{k}/\nu)^{0,67} \quad (8)$$

$$f_0(x)=e^{-x}, \quad f_1(x)=(1-e^{-|x|})/|x|, \quad 1/L=(1/\pi)\int_{\Omega}\partial\Omega/1 \quad (9)$$

где γ^* - локальное турбулентное число Рейнольдса, L - линейный масштаб турбулентности, l - расстояние рассматриваемой точки до стенки БЛД в направлении Ω , \tilde{k} - коэффициент температуропроводности, ν - кинематическая вязкость, $c_1=0,2$ и

$c_2=65$ - эмпирические константы; а в радиальной плоскости вычисляются при помощи алгебраической модели струйной турбулентности Л. Прандтля:

$$\varepsilon_{11}^M = \varepsilon_{22}^M = c_3^2 (\tilde{W}_{\max} - \tilde{W}_{\min}) b, \quad b = (\tilde{W}_{\max} - \tilde{W}_{\min}) / |\partial v_2 / \partial x_1 - \partial v_1 / \partial x_2|_{\max}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{11}^H = \varepsilon_{11}^M / Pr_T, \quad \varepsilon_{22}^H = \varepsilon_{22}^M / Pr_T, \quad Pr_T = \varepsilon_{33}^M / \varepsilon_{33}^H \quad (11)$$

где $\tilde{W} = \sqrt{w_1^2 + w_2^2}$ - модуль вектора скорости в радиальной плоскости, \tilde{W}_{\max} (\tilde{W}_{\min}) - максимальная (минимальная) скорость потока в радиальной плоскости для рассматриваемого шага между лопатками РК, b - ширина слоя смешения, $c_3=0,04$ - эмпирическая константа, которая уточнялась в ходе апробации методики при сравнении экспериментальных и расчетных данных для неравномерного в окружном направлении потока, Pr_T - турбулентное число Л. Прандтля.

Для описания течения в пристеночной области используется модифицированный логарифмический закон профиля скорости при наличии положительного градиента давления, предложенный В.В. Зябриковым и Л.Г. Лойцяным:

$$|\vec{C}_p - \vec{C}_w| / u_\tau = \ln(E n_p^+) / \chi^+ + B^+, \quad n_p^+ = \rho u_\tau n_p / \mu, \quad u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2}, \quad (12)$$

$$\chi^+ = \begin{cases} 0,4 & (p^+ \leq 0,006), \\ 0,36 + 7,2p^+ & (p^+ > 0,006), \end{cases} \quad B^+ = \begin{cases} 5,1 & (p^+ \leq 0,006), \\ 0,118(p^+ + 0,017)^{-1} & (p^+ > 0,006), \end{cases} \quad p^+ = \frac{v}{\rho u_\tau^3} \frac{\partial p}{\partial s},$$

где \vec{C}_p - скорость потока в точке n_p без компоненты нормальной к стенке, \vec{C}_w - скорость потока на стенке, τ_w - абсолютная величина касательного напряжения на стенке; переменные коэффициенты χ^+ и B^+ учитывают снижение прямолинейной части логарифмического профиля скорости и уменьшение угла наклона этой части по отношению к оси абсцисс с увеличением параметра градиента давления p^+ ; направление s совпадает с направлением вектора скорости \vec{C} в абсолютной системе координат. Для вычисления коэффициента турбулентной вязкости в первой точке от стенки используется модифицированная длина пути смешения: $l^+ = \chi n_p^+ \sqrt{1 + p^+ n_p^+}$. Зависимость параметра шероховатости E от безразмерной высоты бугорков шероховатости $h^+ = \rho u_\tau h / \mu$ ($h=2Ra$ - высота бугорков эквивалентной песочной шероховатости) преобразована на основе данных M.R. Malin, J.D. Parry:

$$0 < h^+ \leq 5 \text{ (гидравлически гладкая стенка):} \quad E = 1,0;$$

$$5 < h^+ \leq 100 \text{ (переходная область):} \quad E = [\gamma(h^+/\beta)^2 E_M^2 + 1 - \gamma]^{-1/2}; \quad (13)$$

$$h^+ > 100 \text{ (область развитой шероховатости):} \quad E = \beta / (h^+ E_M),$$

где $\beta=29,7$, $\gamma=1+2X_C^3-3X_C^2$, $X_C=0,02248(100-h^+) \cdot (h^+)^{-0,584}$, $E_M = \exp(\chi^+ B^+)$.

Учет топологии шероховатости, расположенной вдоль концентрических линий при обработке стенок БЛД точением, осуществляется коррекцией h^+ при помощи функции, зависящей от угла потока α , предложенной К.П. Селезевым:

$$F' = 0,5 \cdot \{1 - \cos[0,34 \cdot 10^{-25} F^{25} \cdot \exp(-5/6F) + 2F]\}, \quad F = [2\alpha/\pi]^{0,1}. \quad (14)$$

При внешней турбулентности $\tilde{\epsilon}$ до $\sim 5\%$ и ограниченном положительном градиенте давлений ($p^+ \leq 0,05$) используется предположение о взаимно независимом их влиянии на течение в БЛД. Для учета внешней турбулентности втекающего потока в БЛД коррекция коэффициентов турбулентной диффузии выполняется с помощью множителя $(1+A\tilde{\epsilon})$. Коэффициент A подбирается итерационно в соответствии с зависимостью для максимального по длине БЛД местного коэффициента трения C_f при повышенной турбулентности: $C_{f_{\max}}/C_{f0_{\max}} = 1+3,4\tilde{\epsilon}$, где $C_{f0_{\max}}$ – максимальный по длине БЛД местный коэффициент трения в пограничном слое при естественной турбулентности. Величины C_{f0} и C_f , определяемые как $2u_{\tau}^2/C_{\infty}^2$, где C_{∞} – скорость на границе пограничного слоя, находятся из установившегося решения системы основных уравнений (1) – (3) при соответствующем уровне внешней турбулентности $\tilde{\epsilon}=0$ и $\tilde{\epsilon}>0$.

Невязки в уравнениях (1-3) вычисляются методом контрольного объема. Каждый контрольный объем является шестигранником. Пространственная дискретизация осуществляется со вторым порядком точности. Стационарное решение задачи получается установлением во времени исходной нестационарной системы уравнений. В качестве метода установления используется метод масштабирования сжимаемости. Интегрирование по времени основных уравнений ведется явным методом по 5-ти шаговой схеме Рунге-Кутты. Для ускорения сходимости используется локальный шаг по времени и неявная схема сглаживания невязок, которая разрешается с использованием алгоритма скалярной прогонки и граничных условий Неймана для сглаженных невязок.

Для расчета пространственного потока в БЛД в радиальной плоскости выделяется сектор, равный одному шагу между лопатками РК, на границах которого выполняются условия периодичности для всех параметров. На стенках диффузора задаются условия прилипания. Составляющие скорости в радиальных зазорах между РК и стенками диффузора определяются приближенно через величину внутренних перетечек в лабиринтных уплотнениях колеса и вала. Для давления на входе и для скорости на выходе принимаются условия экстраполяции. На выходе давление фиксируется на одной из стенок, а в остальных точках выходного сечения получается с помощью условия: $\partial p / \partial r|_{\text{вых}, z>0} = \partial p / \partial r|_{\text{вых}, z=0}$. На входе в БЛД задаются радиальная и окружная компоненты скорости с учетом неравномерного характера потока в меридиональной и радиальной плоскости. Распределение осевой компоненты скорости по ширине БЛД может быть получено из анализа распределения радиальной составляющей скорости.

В третьей главе представлены результаты подробной апробации разработанной методики путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными применительно к БЛД ступеней ЦК средней и малой расходности.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными И. Сеноо для БЛД малорасходной ступени с $b_3/D_2=0,028$ проведено на режиме работы с $\alpha_2=8^\circ$.

Результаты расчетов показывают отрывную зону на передней стенке соизмеримую с экспериментальной, рис. 1, перестройку и выравнивание потока к выходу из диффузора, но не обнаруживают небольшую локальную зону отрыва в сечении $D/D_2=1,2$. В выходном сечении наблюдается качественное и количественное совпадение распределений составляющих скоростей по ширине БЛД, что свидетельствует о незначительном влиянии малой локальной зоны отрыва на основные характеристики потока.

Сравнение с экспериментальными данными А.С. Нуждина для типичных ступеней конечного типа средней расходности ($\Phi_p=0,055$, $b_2/D_2=0,049$) с БЛД с параллельными стенками ($b_3/b_2=1,0$) и с криволинейной задней стенкой ($b_3/b_2=0,785$) выполнено на номинальном и минимальном режимах работы. На номинальных режимах работы ступени расчет дает близкие к экспериментальным распределения составляющих скорости потока, но при этом не обнаруживает небольшие локальные зоны отрыва на $D/D_2=1,35$. На минимальных режимах работы ($\alpha_3 \approx 10^\circ$) по данным расчета и эксперимента, рис. 2, радиальная протяженность отрывных зон на обеих стенках БЛД и перестройка потока в меридиональной плоскости практически совпадают. Анализ расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о том, что задание осевой составляющей скорости на входе в диффузор влияет на качественное и количественное описание картины течения в меридиональной плоскости, переброс потока со

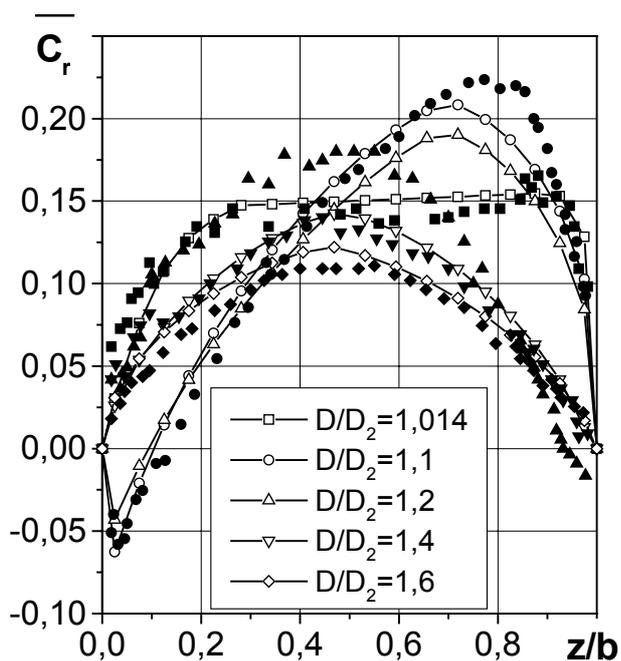


Рис. 1. Распределения радиальной составляющей скорости по ширине БЛД в различных сечениях по длине на режиме малого расхода ($\alpha_2=8^\circ$). Открытые символы – расчет, закрытые символы – эксперимент И. Сеноо.

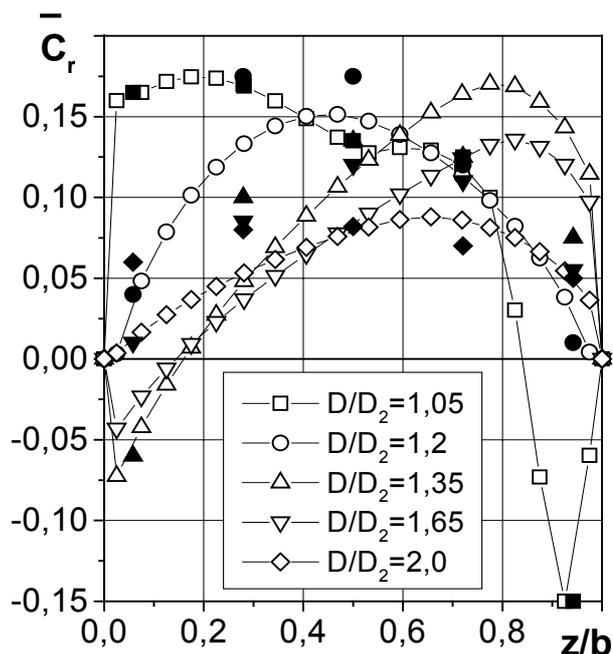


Рис. 2. Распределения радиальной составляющей скорости по ширине БЛД в различных сечениях по длине на режиме минимального расхода ($\alpha_3 \approx 10^\circ$). Открытые символы – расчет, закрытые символы – эксперимент А.С. Нуждина.

стенки на стенку, радиальную протяженность отрывных зон и величину отрыва потока. Наибольшим оказывается влияние входных условий для C_z на режимах минимального расхода.

В относительной системе координат выполнены расчеты потока с шаговой неравномерностью в БЛД с $b_3/b_2=1,1$, который экспериментально исследовался в составе ступени с $\Phi_p=0,042$, $b_2/D_2=0,0545$. Результаты расчетов полностью отражают качественный характер процесса смешения струи и следа, который происходит вплоть до выхода из БЛД, рис. 3. Относительные амплитуды пульсаций радиальной (20%) и окружной (40%) составляющих скорости по экспериментальным данным снижаются к выходу из БЛД до 1 и 3% соответственно. Близкая картина выравнивания неравномерного в окружном направлении потока по экспериментальным и расчетным данным свидетельствует об удовлетворительном выборе модели струйной турбулентности Л.Прандтля.

Для оценки потерь на смешение струй и следов за РК выполнено сравнение результатов расчетов осесимметричного и неравномерного в окружном направлении потока. На режиме расхода $\varphi_2=0,126$ энергетические характеристики БЛД в случае осесимметричного и неравномерного потоков на выходе из колеса практически не отличаются, потери смешения при расчете течения от $D/D_2=1,047$ составляют не более 1%. На режиме расхода $\varphi_2=0,287$ КПД и коэффициент восстановления диффузора (ξ) ниже, соответственно, на 10% и 5% по сравнению с осесимметричным потоком. Таким образом, учет процессов выравнивания неравномерного потока на выходе из

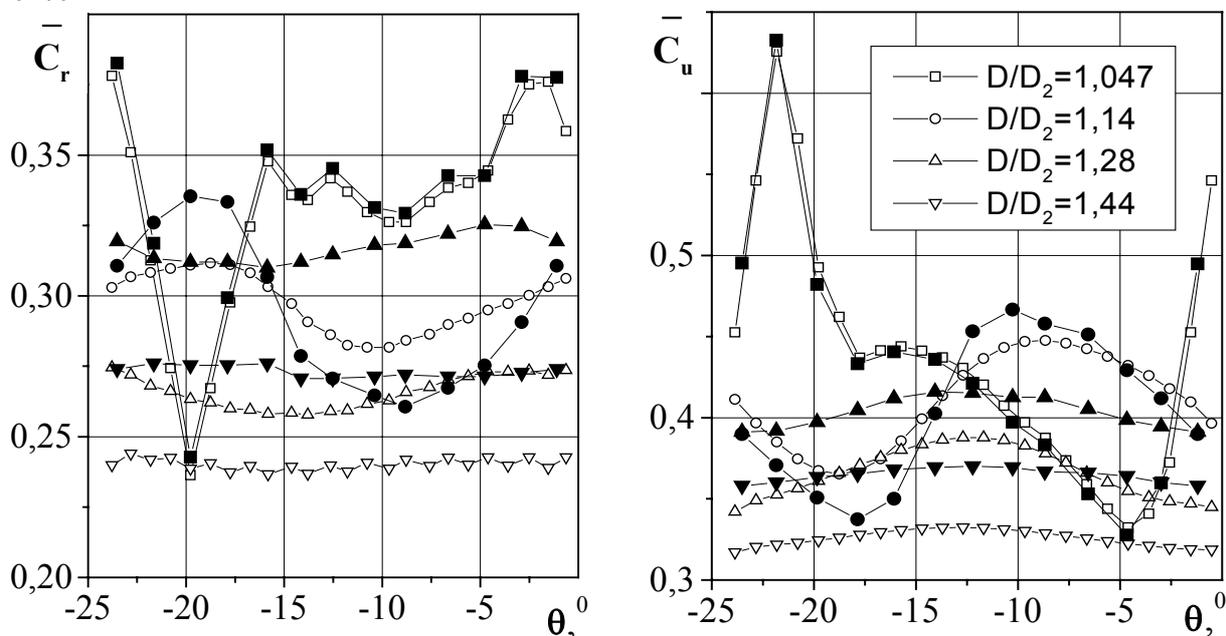


Рис. 3. Распределения параметров потока по окружной координате на режиме расхода $\varphi_2=0,287$ в сечении $z/b=0,5$. Открытые символы – расчет, закрытые символы – эксперимент Р.А. Измайлова.

РК позволяет приблизить результаты расчета к экспериментальным данным на режимах, на которых наблюдается повышенная неравномерность.

Расчеты осесимметричного потока выполнены в диффузорах малорасходной ступени с $\Phi_p=0,011$, $b_2/D_2=0,017$ без учета (в БЛД с $b_3/b_2=0,84$) и с учетом (в БЛД с $b_3/b_2=1,0$) турбулентности набегающего потока в диапазоне расходов $\Phi=0,0086...0,0165$. На основании экспериментальных данных Р.А. Измайлова величина $\tilde{\epsilon}$ принималась для всех режимов работы равной 5%. Отрывы пространственно-пограничного слоя на начальном участке малорасходных БЛД, обычно предшествующие неустойчивому режиму типа “вращающийся срыв”, не обнаружены во всем диапазоне исследованных режимов работы ступени. В сечении $D/D_2=1,1$ наблюдается наиболее заметное качественное и количественное расхождение экспериментальных и расчетных данных по полному давлению, окружной составляющей и абсолютной скорости из-за окружной неравномерности потока на выходе из РК, которая не учитывается при расчете осесимметричного потока. В сечении $D/D_2=1,4$ происходит выравнивание параметров потока на всех режимах расходов и на участке $D/D_2=1,4...1,77$ структура потока соответствует развитому течению.

Осредненные по сечению расчетные и экспериментальные радиальные и окружные составляющие скорости практически совпадают по всей длине БЛД на всех режимах расходов, рис. 4. Расчетные данные по коэффициенту восстановления превышают экспериментальные в среднем на 2...4%. Погрешность расчетных данных при определении коэффициента потерь (ζ) на оптимальном режиме расхода минимальна и не превышает 4%. На других режимах работы по данным расчета и эксперимента на входном участке БЛД коэффициент потерь отличается на 7...10%, а на выходе их расхождение не превосходит 5%. Погрешность определения КПД на всех режимах работы максимальна на входном участке БЛД, уменьшается с увеличением относительной длины БЛД и составляет примерно 3...5% в сечении $D/D_2=1,77$. Таким образом, учет

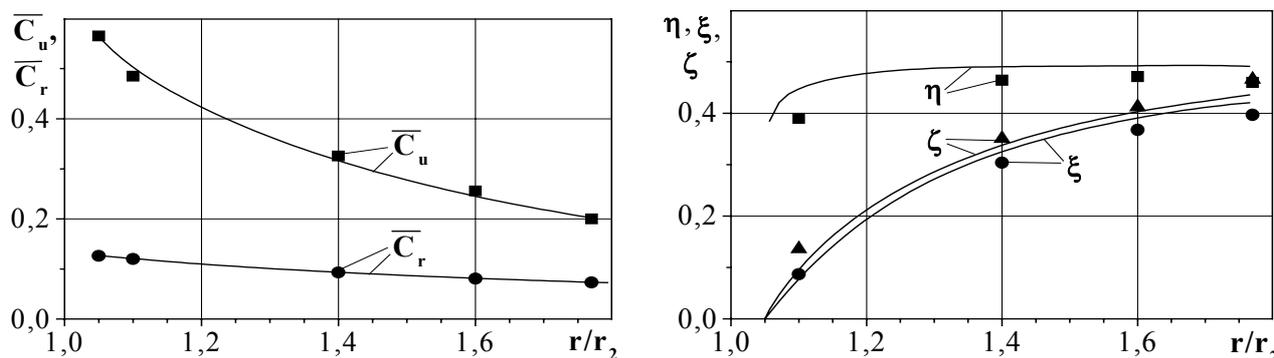


Рис. 4. Осредненные по сечению расчетные и экспериментальные составляющие скорости и энергетические показатели БЛД на режиме расхода $\Phi=0,011$ ($\alpha_3=12,5^\circ$): сплошная линия – расчет, символы – эксперимент.

турбулентности набегающего потока позволяет существенно уменьшить количественное отличие расчетных и экспериментальных значений параметров потока и энергетических характеристик диффузора.

В четвертой главе представлены результаты численного исследования влияния ряда геометрических и режимных параметров на течение и энергетические характеристики БЛД малорасходной ступени с $\Phi_p = 0,011$.

Исследование осесимметричного потока с учетом внешней турбулентности выполнено в БЛД с относительными ширинами $b_3/b_2 = 0,84 \dots 1,35$, входящих в состав ступени с РК с $\Psi_T = 0,63$ и $b_2/D_2 = 0,017$, при $M_u = 0,75 \dots 0,78$, $Re_u = (1,5 \dots 2) \cdot 10^5$ и средней высоте бугорков шероховатости поверхности $h = 2Ra = 5 \cdot 10^{-6}$ м. Общий вид входного участка БЛД с $b_3/b_2 = 0,84$ представлен на рис. 5 пунктирной линией. БЛД с $b_3/b_2 = 1,0, 1,2, 1,35$ получаются в результате симметричного сдвига стенок относительно оси колеса.

Сужение БЛД до $b_3/b_2 = 0,84$ приводит к быстрому выравниванию скоростей потока во входном участке и симметричному распределению параметров потока по ширине БЛД при $D/D_2 > 1,25$. Результатом сужения БЛД является отсутствие отрыва потока во входном участке БЛД при всех исследованных режимах течения вплоть до $\alpha_2 = 7^\circ$, что обеспечивает зону устойчивой работы $\sim 50\%$. К выходу из БЛД ($D/D_2 = 1,77$) угол потока возрастает на $\sim 10^\circ$ и скорость потока снижается до $C/u_2 \approx 0,2$ из-за больших потерь в малорасходных диффузорах. При ограниченной радиальной длине $D/D_2 = 1,45$ достигается замедление потока $C/C_2 \approx 0,5$ и $\sim 90\%$ суммарного повышения давления в диффузоре. Полученные результаты позволяют ограничить радиальную протяженность малорасходного диффузора до $D/D_2 = 1,45$. Низкие коэффициенты восстановления давления малорасходных диффузоров приводят к малым градиентам давлений, особенно в выходной части узких диффузоров, что препятствует образованию отрывов потока во всей области течения в БЛД с $b_3/b_2 = 1,0$ и $1,2$ при $\alpha_2 = 7^\circ$. В БЛД с $b_3/b_2 = 1,35$ при угле потока $\alpha_2 = 7^\circ$ расчеты показывают существование пространственного отрыва потока, занимающего $\sim 10\%$ шири-

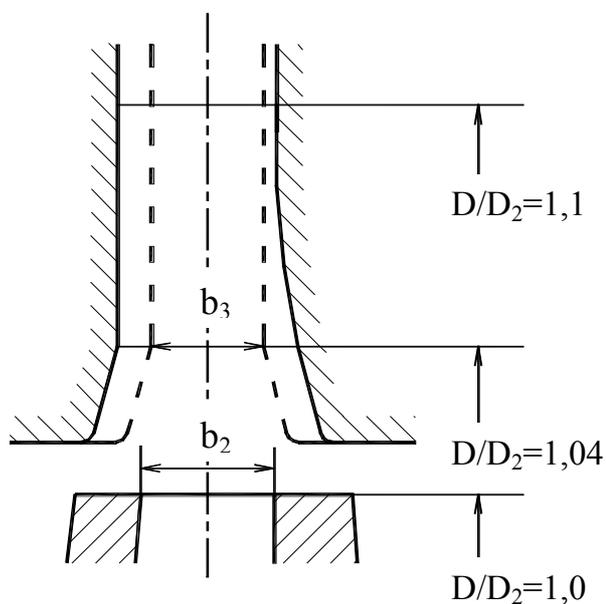


Рис. 5. Общий вид входного участка БЛД с $b_3/b_2 = 0,84$ (пунктирная линия) и профилированной стенкой (сплошная линия).

ны канала. При угле потока $\alpha_2 > 9^\circ$ отрыв потока на входном участке диффузора по расчетным данным не происходит.

Увеличение b_3/b_2 от 0,84 до 1,35 приводит к снижению ζ на 10...15% и росту ξ на 10% в зоне оптимальных углов потока 14...15°, рис. 6. Обнаруженный по результатам расчета рост коэффициента потерь при максимальном угле потока $\alpha_2 = 27,5^\circ$ в БЛД с $b_3/b_2 = 0,84$ объясняется учетом потерь на участке между выходом из РК и началом параллельных стенок диффузора из-за расширения потока за РК и последующего сужения при входе в БЛД в меридиональной плоскости. При максимальных углах потока α_2 потери на входном участке являются наибольшими из-за роста радиальной составляющей скорости вследствие сужения диффузора. Влияние b_3/b_2 наибольшим образом сказывается на характеристиках БЛД при их работе в области больших коэффициентов расхода, что определяется противоположным характером изменения потерь поверхностного трения и вторичных течений. С увеличением b_3/b_2 интенсивность вторичных течений возрастает из-за уменьшения угла потока при низких коэффициентах расхода. При работе на правой ветви характеристики суммарные потери напора в основном определяются потерями трения, которые снижаются при возрастании b_3/b_2 , что приводит к росту ξ и КПД диффузора.

Для ликвидации отрыва потока во входном участке диффузора на малых режимах работы ступени спроектирован диффузор БЛД1,2П с криволинейной задней стенкой во входном участке. Ширина диффузора в меридиональной плоскости меняется от $b/b_2 = 1,35$ на диаметре $D/D_2 = 1,038$ до $b/b_2 = 1,2$ на диаметре $D/D_2 = 1,1$ за счет криволинейной задней стенки, рис. 5. Расчеты вязкого потока показали, что криволинейная стенка обеспечивает ускорение потока, вследствие чего ликвидируется отрыв потока при минимальном коэффициенте расхода. На режимах течения с $\alpha_2 = 10..27^\circ$

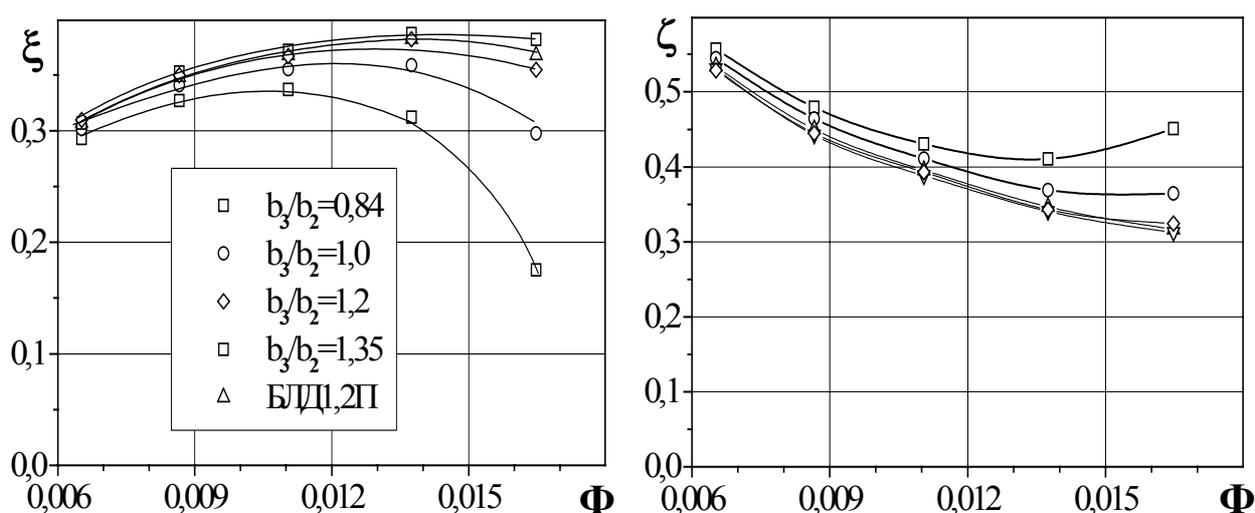


Рис. 6. Энергетические характеристики БЛД с различными ширинами в зависимости от коэффициента расхода ступени в сечении $D/D_2 = 1,45$.

отрыв потока не наблюдается во всем поле течения. Таким образом, улучшенная конструкция диффузора обеспечивает зону устойчивой работы в пределах до 50% от оптимального расхода. Во всем диапазоне расходов для БЛД1,2П практически сохраняются значения коэффициента восстановления давления и коэффициента потерь, характерных для БЛД с $b_3/b_2=1,35$, рис. 6.

Исследование влияния числа Рейнольдса в диапазоне $Re_u=1,5 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^6$ ($Re_C=2b_2C_2/v_2=8 \cdot 10^4 \dots 3,3 \cdot 10^6$) и шероховатости поверхности в диапазоне $h=(2,5 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ м выполнено для диффузора БЛД1,2П. Влияние шероховатости сказывается в основном на изменении осредненных по сечению параметров потока по длине диффузора, а качественная картина распределения параметров потока по ширине диффузора практически не изменяется. Значительное влияние оказывает шероховатость поверхности стенок на энергетические характеристики диффузора. На оптимальном режиме работы ступени, рис. 7, с увеличением числа Re_C от $1,3 \cdot 10^5$ до $3,3 \cdot 10^6$ при $h=10 \cdot 10^{-6}$ м КПД повышается на 5,5%, при $h=2,5 \cdot 10^{-6}$ м - на ~10%. При обычно принимаемой чистоте обработки стенок проточной части $h=5 \cdot 10^{-6}$ м с увеличением числа Re_C до $3,3 \cdot 10^6$ потери в диффузоре снижаются на ~22%, а его КПД может достигать 57% на оптимальном режиме работы ступени. Значения числа Рейнольдса, при котором прирост КПД и уменьшение коэффициента потерь резко снижаются составляют $Re_C=4 \cdot 10^5$ при средней величине бугорков шероховатости $h=10 \cdot 10^{-6}$ м, $Re_C=6,5 \cdot 10^5$ при $h=5 \cdot 10^{-6}$ м и $Re_C > 3,3 \cdot 10^6$ при $h=2,5 \cdot 10^{-6}$ м. С ростом числа Re_u более заметно снижаются потери и растет КПД, рис. 8, на режимах малых расходов, где потери трения наибольшие, а влияние шероховатости поверхности ми-

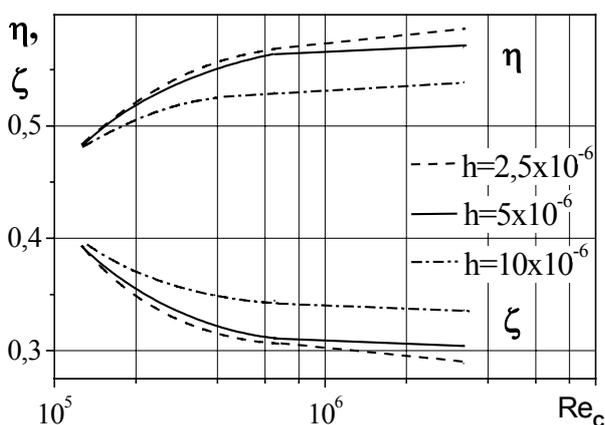


Рис. 7. Энергетические характеристики БЛД1,2П в сечении $D/D_2=1,45$ на оптимальном режиме расхода в зависимости от числа Re_C при различной шероховатости поверхности.

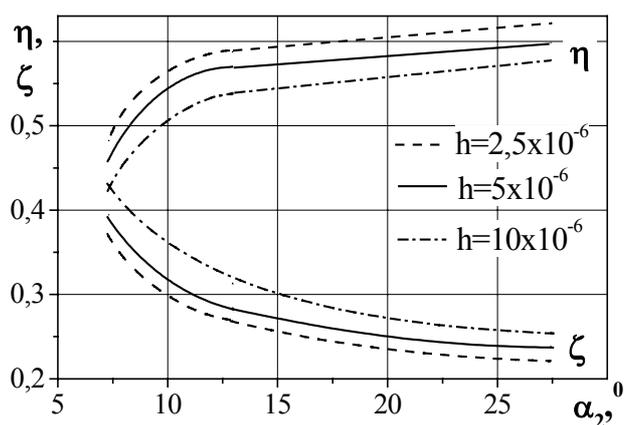


Рис. 8. Энергетические характеристики БЛД1,2П в зависимости от угла потока на выходе из РК при $Re_u=(4 \dots 5) \cdot 10^6$ и различной шероховатости поверхности.

нимально из-за малых углов потока. Это приводит к тому, что энергетические характеристики БЛД в зависимости от режима работы принимают более пологий вид при более высоких числах Рейнольдса.

Влияние числа Маха исследовано применительно к профилированному диффузору БЛД1,2П малорасходной ступени с $\Phi_p=0,011$ при изменении $M_u=0,56...0,87$ ($M_c=0,3...0,6$) за счет изменения окружной скорости вращения РК $u_2=200...320$ м/с. При относительно низком уровне чисел M_u их влияние сводится в основном к влиянию сжимаемости. Осредненные параметры потока по длине диффузора наиболее существенно изменяются на режимах больших расходов. По результатам расчетов при $M_u=0,87$ на правой ветви характеристики при $\alpha_2 > 20...25^\circ$ наблюдается увеличение коэффициента потерь на 8% и снижение КПД на 3%, что объясняется повышенным влиянием положительных градиентов давления при возрастании углов потока в диффузоре. В целом исследование при различных числах M_u показывает относительно малое влияние сжимаемости на энергетические характеристики диффузоров, что объясняется высоким уровнем потерь, и, соответственно, низкими коэффициентами восстановления давления диффузоров малорасходных ступеней.

Для оценки эффективности БЛД малорасходных ступеней пониженной напорности выполнено численное исследование течения и потерь в профилированном диффузоре БЛД1,2П при его работе в составе ступени с РК, имеющими на расчетном режиме коэффициенты теоретического напора $\psi_T=0,5$ и коэффициенты расхода ($\varphi_{2p}=0,15$ и при $\varphi_{2p}=0,13$). При исследованных выходных углах потока из РК течение в БЛД1,2П является безотрывным вплоть до $\alpha_2=6^\circ$. В зоне оптимальных и больших коэффициентов расхода КПД растут, а коэффициенты потерь снижаются при уменьшении C_u , рис. 9а, из-за увеличения угла α_2 и уменьшения длины траектории

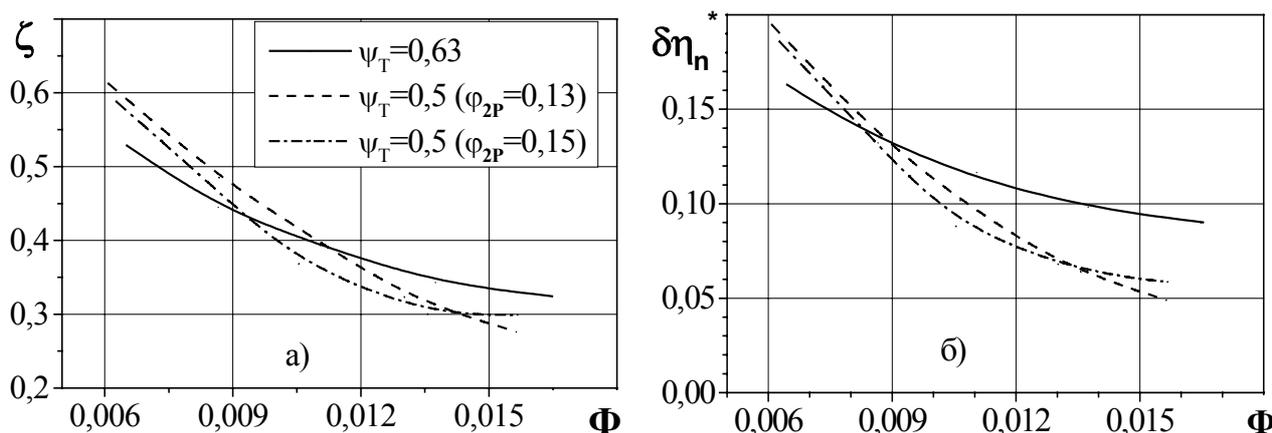


Рис. 9. Зависимости коэффициента потерь (а) и абсолютного снижения КПД ($\delta\eta$) (б) от условного коэффициента расхода ступени (Φ) для диффузора БЛД1,2П в сечении $D/D_2=1,45$ при различных коэффициентах теоретического напора РК.

потока в диффузоре. Потери напора в целом в диффузоре снижаются как за счет снижения коэффициента потерь, так и из-за уменьшения скорости C_2 на выходе из РК. В зоне малых коэффициентов расхода величины коэффициентов потерь диффузоров ступеней с $\Psi_{\text{Тр}}=0,5$ оказываются выше, чем для ступени с $\Psi_{\text{Тр}}=0,63$, а КПД - ниже. Это связано с более высокими значениями теоретического напора для исследуемых ступеней при $\Phi < 0,085$. На рис. 9б приведены зависимости абсолютного снижения КПД ступени в диффузоре БЛД1,2П $\delta\eta_n^* = \zeta_{\text{БЛД}} \cdot C_2^2 / [2\Psi_{\text{Т}}(1+\beta_{\text{пр}}+\beta_{\text{тр}})u_2^2]$, где $1+\beta_{\text{пр}}+\beta_{\text{тр}}$ - относительная величина потерь на протечки и трение дисков. В ступенях с $\Psi_{\text{Тр}}=0,5$ происходит увеличение КПД на 3...4% в зоне оптимальных расходов по сравнению со ступенями большей напорности за счет снижения потерь в диффузоре.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В соответствии с постановкой задачи разработана методика и создан программный комплекс на ПЭВМ для анализа трехмерного вязкого сжимаемого потока в безлопаточных диффузорах произвольной геометрической формы на основе решения полных уравнений Навье-Стокса методом контрольного объема с учетом неравномерности параметров потока по шагу на выходе из межлопаточных каналов РК, протечек и перетечек в области входа в диффузор, положительного градиента давления, топологии шероховатости механически обработанных стенок БЛД, повышенной турбулентности втекающего потока в БЛД, что позволяет исследовать параметры потока и энергетические характеристики диффузоров во всем диапазоне работы ступени.

2. Проведена обширная апробация разработанного метода путем сравнения результатов расчетов с имеющимися в отечественной и зарубежной литературе экспериментальными данными для осесимметричного и неравномерного по шагу межлопаточного канала РК потока применительно к БЛД ступеней ЦК средней и малой расходности. В ходе апробации методики получены следующие результаты:

- задание осевой составляющей скорости на входе в диффузор, обычно не регистрируемой в ходе эксперимента, влияет на качественное и количественное описание картины течения в меридиональной плоскости, переброс потока со стенки на стенку, радиальную протяженность отрывных зон и величину отрыва потока;

- учет процессов выравнивания неравномерного потока на выходе по шагу РК позволяет приблизить результаты расчета к экспериментальным данным на режимах минимальных и максимальных расходов, где наблюдается повышенная неравномерность;

- учет повышенной турбулентности втекающего потока в БЛД позволяет существенно уменьшить количественное отличие расчетных и экспериментальных значений параметров потока и энергетических характеристик диффузора.

- показано хорошее качественное и количественное соответствие расчетных и

экспериментальных данных, в том числе на малых режимах расходов при наличии отрывных явлений в БЛД, и, таким образом, доказана возможность использования разработанной методики для исследования течения и энергетических характеристик БЛД ступеней ЦК.

3. Выполнено численное исследование влияния геометрических (b_3/b_2 , D_4/D_2 , h) и режимных (α_2 , Re_u , M_u) параметров для БЛД малорасходной ступени с $\Phi=0,011$ и получены следующие результаты:

- показана возможность эффективной работы БЛД с параллельными стенками и $1,0 < b_3/b_2 \leq 1,35$ при $\alpha_2 > 9^\circ$;

- радиальная протяженность БЛД малорасходной ступени может быть ограничена величиной $D_4/D_2 = 1,4 \dots 1,5$;

- рекомендован БЛД1,2П с профилированной задней стенкой и $b_4/b_2 = 1,2$, обеспечивающий безотрывное течение потока при $\alpha_2 \geq 7^\circ$, зону устойчивой работы до 50% от номинального режима, снижение коэффициента потерь на 10...15% и рост коэффициента восстановления давления на 10% в зоне оптимальных углов потока ($14 \dots 15^\circ$) по сравнению с БЛД с $b_3/b_2 = 0,84$;

- показано, что необходимо учитывать топологию шероховатости и угол потока при оценке влияния чистоты обработки стенок на энергетические характеристики БЛД;

- с увеличением Re_u от $(1,5 \dots 2) \cdot 10^5$ и $(4 \dots 5) \cdot 10^6$ при чистоте поверхности стенок диффузора $h = 5 \cdot 10^{-6}$ м профилированный диффузор БЛД1,2П обеспечивает в области оптимальных режимов работы более высокие КПД (на 4%) и более низкие коэффициенты потерь (на ~15%), чем БЛД с $b_3/b_2 = 0,84$;

- снижение коэффициента потерь на 22...27% и повышение коэффициента восстановления давления БЛД1,2П на ~10% при чистоте обработки поверхностей $(2,5 \dots 5) \cdot 10^{-6}$ м и возрастании числа Re_c от $1,3 \cdot 10^5$ до $3,3 \cdot 10^6$ показывает перспективу применения малорасходных ступеней с БЛД для компрессоров высокого давления;

- полученные значения чисел Рейнольдса, при которых прирост КПД и уменьшение коэффициента потерь резко снижаются в зависимости от высоты бугорков шероховатости, позволяют выбрать оптимальную чистоту обработки стенок диффузора в зависимости от реальных условий работы;

- получено относительно малое влияние сжимаемости на энергетические характеристики БЛД малорасходных ступеней;

- показана возможность повышения эффективности малорасходных ступеней пониженной напорности $\Psi_{Tr} = 0,5$ с профилированным диффузором с $b_3/b_2 > 1$ за счет снижения потерь в БЛД, уменьшения повышенного для малорасходных ступеней замедления потока в неподвижных элементах и соответствующего снижения потерь в неподвижных элементах в целом.

Публикации по теме диссертации

1. Евтушенко А.И., Гапонов А.К., Ноткина И.М., Селезнев К.П. Расчет течения вязкого сжимаемого газа в проточной части малорасходных центробежных компрессорных ступеней // Химич. и нефтегазовое машиностроение. –1998. №1. –С. 28-30.
2. Евтушенко А.И., Гапонов А.К., Ноткина И.М., Селезнев К.П. О течении вязкого сжимаемого газа в проточной части малорасходных центробежных компрессорных ступеней // Тез. докл. XI межд. научн.-техн. конф. по компрессорной технике. – Казань, 1998. –С. 155-156.
3. Стрижак Л.Я., Ноткина И.М., Селезнев К.П. Расчет течения вязкого потока и эффективности безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней на основе метода конечных объемов // Семинар "Потребители – производители компрессоров и компрессорного оборудования – 1999". –СПб, 1999. –С. 152-157.
4. Ноткина И.М., Стрижак Л.Я., Суслина И.П., Байер Б., Баам Ф., Раутенберг М. Сравнение результатов экспериментального исследования с теоретическим расчетом трехмерного сжимаемого турбулентного потока в безлопаточном диффузоре малорасходной ступени центробежного компрессора // Тез. докл. XII межд. научн.-техн. конф. по компрессорной технике. – Казань, 2001. –С. 52-55.
5. Notkina I.M., Strizhak L.Ja., Suslina I.P., Beyer B., Bahm F., Rautenberg M. Investigation of the three-dimensional compressible turbulent flow in vaneless diffuser of radial turbomachine stage // 5th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. – Gdansk, 2001. Vol.1. – P. 255-264.
6. Ноткина И.М. Повышение эффективности малорасходных безлопаточных диффузоров на основе расчета трехмерного вязкого потока // Сб. тр. СПбГПУ VI Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах": Тез. докл. –СПб, 2002. Т. 1. – С. 241-242.
7. Ноткина И.М., Стрижак Л.Я., Суслина И.П., Байер Б., Раутенберг М. Совершенствование метода расчета трехмерного вязкого турбулентного потока в малорасходных безлопаточных диффузорах на основе экспериментальных данных // Компрессорная техника и пневматика. – 2002. № 7. – С. 6-13.
8. Ноткина И.М. Исследование малорасходных безлопаточных диффузоров различной относительной ширины на основе расчета трехмерного вязкого потока // Тез. докл. VI научн.-техн. конф. молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин». –Казань, 2002. –С. 44-45.
9. Ноткина И.М., Стрижак Л.Я. Повышение эффективности безлопаточных диффузоров малорасходных центробежных компрессорных ступеней на основе анализа трехмерного вязкого потока // Компрессорная техника и пневматика. –2002. № 10, –С. 20-25.
10. Notkina I.M., Strizhak L.Ja. Numerical investigation of flow and performance of vaneless low flow centrifugal compressor stage diffusers of various relative width // 5th European Conference on Turbomachinery. –Prague, 2003. –P. 107-116.