

УДК 621. 513.3. 001. 573

М.Ю. ШЕЛКОВСКИЙ

“Зоря”-“Машипроект” ГП НПКГ, Николаев, Украина

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТОК

В работе рассмотрены вопросы формирования геометрии лопаточных венцов компрессорной решетки при введении окружного навала и S-образности профиля пера лопатки. Представлен расчетный CFD-анализ характеристик таких компрессорных решеток, выполненный с помощью программного комплекса ANSYS CFX 12.1. Получены новые расчетные зависимости для угла отставания во вращающейся решетке рабочего колеса с S-образной формой средней линии, от угла изгиба профиля и угла входа потока. Показан характер распределения некоторых аэродинамических характеристик по высоте проточной части при введении различных форм навала лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата, по результатам CFD-расчетов.

Ключевые слова: компрессор, профиль пера лопатки, угол отставания, средняя линия, навал, рабочее колесо, направляющий аппарат, характеристика, коэффициент полезного действия.

Введение

Для улучшения эффективности многоступенчатых осевых компрессоров с высокой степенью повышения давления необходимо создание высокоэкономичных ступеней [1]. Поток в межлопаточных каналах ступеней компрессора вязкий, сжимаемый, неустановившийся, с достаточно сложной структурой течения [2], требующей учета при проектировании. Наличие современных программных комплексов (ANSYS CFX, FlowER и др.) хотя и является важным шагом в данном направлении, требует дополнительных усилий для практической их реализации особенно в задачах оптимизации лопаточных венцов, ступеней и многоступенчатых компрессоров в целом [3]. В настоящее время остаются актуальными вопросы создания методов 3D профилирования лопаточных венцов на основе анализа пространственной формы течения, и их параметрические исследования [4].

1. Постановка задачи

Как известно, актуально снижение профильных потерь в компрессорных решетках рабочих колес (РК) и направляющих аппаратов (НА). Кроме этого, вторичные и концевые потери являются основной причиной снижения КПД современных осевых компрессоров, особенно при малых высотах лопаток. Одно из мероприятий по улучшению структуры течения в концевых областях - применение лопаточных венцов с навалом (наклоном пера лопатки в окружном направлении) [5]. Применение навала

приводит к перераспределению нагрузки вдоль профиля пера лопатки компрессорной решетки [5], изменению структуры нестационарного взаимодействия РК и НА [6]. Изменение коэффициента напора и КПД по высоте лопатки при этом зависит от общей нагруженности ступени. Однако данные по влиянию различных форм навала на параметры ступени компрессора противоречивы [7-9].

Анализ эффектов радиального зазора показал целесообразность использования S-образной формы средней линии профиля пера лопатки в концевых областях для снижения интенсивности вихря перетекания в зазоре [10]. Аналогичная форма профиля (по всей высоте) была получена ранее для сверхзвуковых решеток, при управлении диффузорностью межлопаточных каналов, для обеспечения изоэнтропического торможения потока на поверхности спинки профиля [2]. Применение “специального” профилирования лопаточных венцов [11] в дозвуковых решетках профилей многоступенчатых компрессоров стационарных ГТД позволило повысить их эффективность [12, 13].

Применение навала, S-образности может дать заметный выигрыш в КПД как в первых, так и в последних ступенях. Однако имеющаяся в литературе информация не систематизирована и малоприспособлена к практическому использованию. Неясно, в частности, влияние навала на характеристики ступени в широком диапазоне расхода, угол отставания потока на выходе из компрессорной решетки, недостаточно информации о распределении коэффициента потерь вдоль профиля при введении различных форм навала и S-образности. Поэтому для внедрения этих ме-

роприятий необходим предварительный подробный анализ, в частности методами CFD.

2. Геометрическая модель

Задачи формирования геометрии лопаточных венцов РК и НА компрессорной решетки при введении окружного навала и S-образности профиля пера лопатки решались в работе с использованием системы автоматического проектирования [14] и ПК ANSYS CFX [15].

Рассмотрим аэродинамический профиль компрессорной решетки, который образуется путем деформации исходного (симметричного) профиля [14]. Средняя линия исходного профиля изгибается по заданному закону так, чтобы углы в точках пересечения ее с осью абсцисс (0;0) (B_i ;0) в начальной системе координат (ось абсцисс – хорда, ось ординат – перпендикуляр к хорде) равнялись соответственно γ_{1i} и γ_{2i} (рис. 1). За положительное направление оси X_i принято направление от носика к хвосту профиля. Средняя линия изогнутого профиля может представлять дугу окружности, дугу гиперболы или полиномиальную зависимость:

$$Y_i = a + b \cdot X_i + c \cdot X_i^2 + d \cdot X_i^3 + f \cdot X_i^4 + e \cdot X_i^5 \quad (1)$$

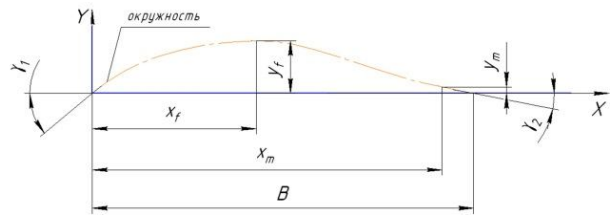


Рис. 1. Схема средней линии исходного профиля в начальной системе координат

Для нахождения коэффициентов (a, b, c, d, f, e), а также величин γ_{1i} и γ_{2i} выполняется решение системы уравнений на некотором радиусе R_i (2). Первые пять уравнений следуют из геометрического представления средней линии исходного профиля в системе координат (рис. 1), шестое и седьмое уравнение предполагает форму средней линии в виде дуги окружности на входном участке профиля (на расстояниях $\left(\frac{B_i}{25}\right)$ и $\left(\frac{B_i}{30}\right)$ по хорде). Восьмое уравнение описывает S-образность профиля в области выходной кромки.

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 0 \\ \operatorname{tg}(\gamma_{1i}) = b_i \\ \operatorname{tg}(\gamma_{1i} + \theta_i) = b_i + 2 \cdot c_i \cdot B_i + 3 \cdot d_i \cdot B_i^2 + 4 \cdot f_i \cdot B_i^3 + 5 \cdot e_i \cdot B_i^4; \quad \gamma_2 > 0 \\ 0 = b_i + 2 \cdot c_i \cdot \left(\overline{X_{fi}}\right) + 3 \cdot d_i \cdot \left(\overline{X_{fi}}\right)^2 + 4 \cdot f_i \cdot \left(\overline{X_{fi}}\right)^3 + 5 \cdot e_i \cdot \left(\overline{X_{fi}}\right)^4 \\ 0 = a_i + b_i \cdot B_i + c_i \cdot B_i^2 + d_i \cdot B_i^3 + f_i \cdot B_i^4 + e_i \cdot B_i^5 \\ a_i + b_i \cdot \left(\frac{B_i}{25}\right) + c_i \cdot \left(\frac{B_i}{25}\right)^2 + d_i \cdot \left(\frac{B_i}{25}\right)^3 + f_i \cdot \left(\frac{B_i}{25}\right)^4 + e_i \cdot \left(\frac{B_i}{25}\right)^5 = \left[\sqrt{\left(\frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_1)}\right)^2 - \left(\left(\frac{B_i}{25}\right) - \frac{B_i}{2}\right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})} \\ a_i + b_i \cdot \left(\frac{B_i}{30}\right) + c_i \cdot \left(\frac{B_i}{30}\right)^2 + d_i \cdot \left(\frac{B_i}{30}\right)^3 + f_i \cdot \left(\frac{B_i}{30}\right)^4 + e_i \cdot \left(\frac{B_i}{30}\right)^5 = \left[\sqrt{\left(\frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_1)}\right)^2 - \left(\left(\frac{B_i}{30}\right) - \frac{B_i}{2}\right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})} \\ P_{Si} \cdot \left(\theta_i - \left((\beta_{устi})_{исх} - \beta_{1\Gamma i} \right) \right) + \left((\beta_{устi})_{исх} - \beta_{1\Gamma i} \right) = \gamma_{1i}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где i – номер сечения по высоте; (a, b, c, d, f, e) – коэффициенты полинома (2); B_i – хорда профиля на i -м радиусе; $\left(\overline{X_{fi}}\right)$ – абсцисса максимального прогиба средней линии профиля на i -м радиусе; γ_{1i} и γ_{2i} – углы наклона средней линии в точках пересечения ее с осью абсцисс на i -м радиусе; θ_i – угол изгиба профиля на i -м радиусе; P_{Si} – параметр S-

образности средней линии профиля, $(\beta_{устi})_{исх}$ – исходный угол установки решетки на i -м радиусе (при $P_{Si} = 0$), $(\beta_{1\Gamma i})_{исх}$ – исходный геометрический угол входа на i -м радиусе (при $P_{Si} = 0$).

Изменение управляющего параметра P_{Si} может осуществляться по определенному закону вдоль высоты профиля пера лопатки в диапазоне

$P_{Si} = (0 \div (P_{Si})_{\max})$, где $(P_{Si})_{\max}$ – максимальное значение параметра при $\gamma_{2i} \approx 0$. Увеличение управляющего параметра P_{Si} соответствует большей S-образности в области выходной кромки. Пересчет координат профиля из системы координат (рис. 1) в базовую систему координат с учетом угла установки профиля производится по зависимостям:

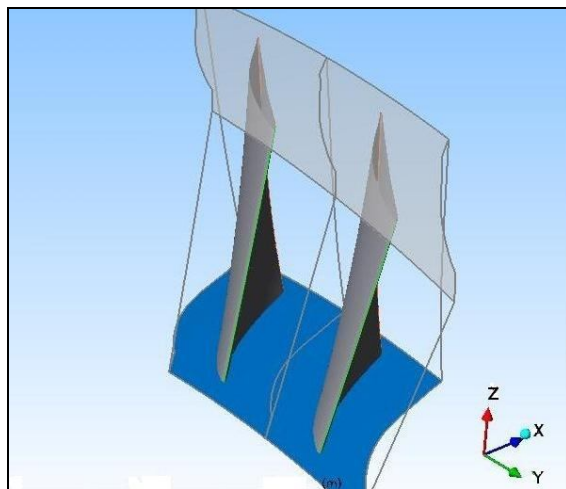
$$\beta_{уст i} = \beta_{li} + \gamma_{li}, \quad (3)$$

$$X_{баз i}(X_i) = X_i \cdot \cos(\beta_{уст i}) - Y_i(X_i) \cdot \sin(\beta_{уст i}), \quad (4)$$

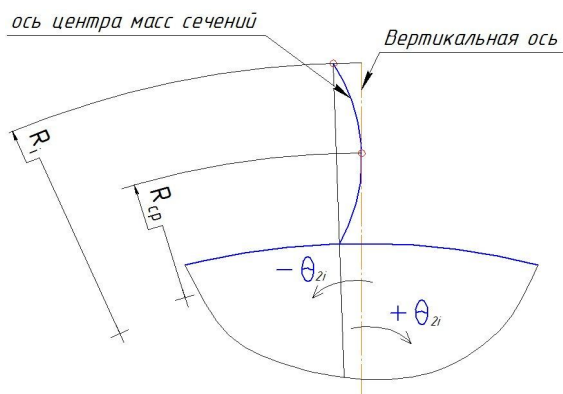
$$Y_{баз i}(X_i) = X_i \cdot \sin(\beta_{уст i}) + Y_i(X_i) \cdot \cos(\beta_{уст i}), \quad (5)$$

где $\beta_{уст i}$ – угол установки профиля; $X_{баз i}(X_i)$, $Y_{баз i}(X_i)$ – координаты средней линии в базовой системе координат.

Введем навал профиля пера лопатки в окружном направлении за счет придания оси центра масс сечений лопатки формы кривой, при этом положение оси центра масс на i -м радиусе задается углом θ_{2i} (угол поворота оси Z вокруг оси X , от оси Z до оси Y , рис. 2):



а



б

Рис. 2. Расчетная схема для формирования навала профиля пера лопатки (а – схема канала; б – схема формирования навала в окружном направлении)

По известным для каждого сечения по высоте лопатки геометрии средней линии, координатам симметричного профиля, значениям радиусов входной и выходной кромок, относительной максимальной толщине профиля ($\bar{C}_{\max i}$), значению угла θ_{2i} выполняется формирование геометрической модели профиля пера лопатки. Предложенная геометрическая модель требует для своей реализации специального программного обеспечения. Задача формирования твердотельной модели профиля пера лопатки была решена с помощью ПК ANSYS CFX 12.1 (модуль BladeGen), а также дополнительных макросов – подпрограмм “Tetta.exe” в ПК “Fortran” (формирование средней линии по высоте модели профиля пера лопатки с учетом угла установки), “midline.xmcd” в ПК Mathcad 14.0 (нахождение коэффициентов полиномиальной зависимости (2) с учетом угла установки и формирование средней линии профиля), “Cmax.exe” в ПК “Fortran” (формирование исходного симметричного профиля для плоского сечения на i -м радиусе с учетом заданной относительной максимальной толщины профиля).

Представленный выше метод формирования геометрии профиля пера лопатки был использован при выполнении вычислительных экспериментов. Ниже приведены результаты CFD-анализа влияния изменения геометрических параметров профиля пера лопатки: навала в окружном направлении (угол θ_{2i}), степени S-образности (параметр P_S) на структуру течения и газодинамические характеристики ступени компрессора.

3. Объект исследования

Для оценки влияния S-образности формы средней линии профиля пера лопатки ПК на ее характеристики рассматривалась средняя ступень компрессора высокого давления стационарного ГТД [16] (рис. 3).

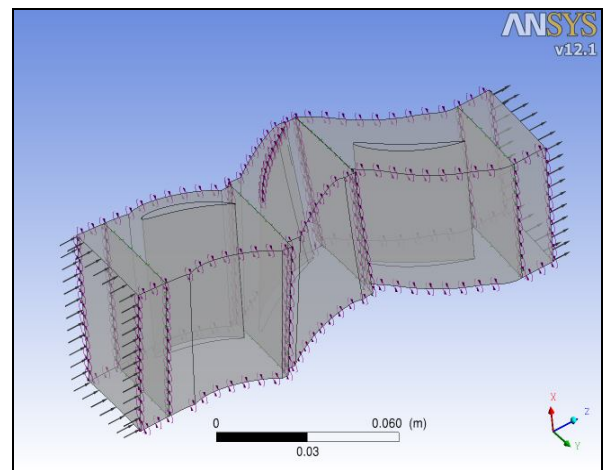


Рис. 3. Расчетная схема для CFD-исследований

Профилирование лопаточных венцов осуществлялось по закону постоянства циркуляции по высоте. Для задания закрутки потока на входе в РК в расчетах изменялась геометрия фиктивного входного направляющего аппарата.

4. Расчетная модель

При построении расчетной области для лопаточных венцов использовалась импортированная из TurboGrid сетка (рассматривалась периодическая часть, содержащая одну лопатку), с разбиением $(3,5 \cdot 10^6)$ узлов на венец. Параметр y^+ контролировался в процессе расчета ($y^+ < 3$). Применяемая модель турбулентности: SST-Ментера, со степенью турбулентности на входе в компрессор $\varepsilon = 5\%$. Рассматривалась стационарная задача при сочетании граничных условий полное давление на входе, с заданием направления потока – статическое давление на выходе. Используемый тип осреднения на границах расчетной области между соседними венцами: “Stage”. Критерием сходимости расчета являлось установление основных интегральных характеристик потока при достижении минимального значения величин их среднеквадратичных невязок. При моделировании выдерживалось число $Re > 2 \cdot 10^5$ путем задания физических (реальных) условий на входе в расчетную область.

5. Результаты исследований

5.1. Анализ влияния S-образности формы средней линии профиля пера лопатки на характеристики компрессорной решетки

На первом этапе определялось влияние изменения формы средней линии профиля по высоте на коэффициент потерь, угол выхода потока из решетки, фактор диффузорности D .

Исследования проводились на расчетном режиме по расходу и частоте вращения ротора ($n_{пр} = 1,0$ $G_{Впр} = 1,0$).

Всего было исследовано 12 вариантов геометрии РК (см. табл. 1, здесь $(P_S)_{max}$ – величина параметра P_S при $\gamma_2 > 0$).

Густота решетки РК составляла $b/t = 1,16$ на среднем радиусе, относительная высота лопаток $h/b = 1,37$, величина хорды $b = 36,6$ мм, коэффициенты $\bar{H}_{ад}^* = 0,263$, $\bar{C}_{1a} = 0,450$.

Таблица 1

Варианты CFD-расчетов
с изменяемым параметром P_S

№ вар	Отн. высота лопатки, $\bar{h}$	Параметр P_S
1_1	$\bar{h} = 1,0$	$(P_S)_{max} / 4$
1_2	$\bar{h} = 1,0$	$(P_S)_{max} / 2$
1_3	$\bar{h} = 1,0$	$3(P_S)_{max} / 4$
2_1	$\bar{h} = 0,5$	$(P_S)_{max} / 4$
2_2	$\bar{h} = 0,5$	$(P_S)_{max} / 2$
2_3	$\bar{h} = 0,5$	$3(P_S)_{max} / 4$
3_1	$\bar{h} = 0$	$(P_S)_{max} / 4$
3_2	$\bar{h} = 0$	$(P_S)_{max} / 2$
3_3	$\bar{h} = 0$	$3(P_S)_{max} / 4$
4_1	$\bar{h} = 0$, $\bar{h} = 0,5$, $\bar{h} = 1,0$	$(P_S)_{max} / 4$
4_2	$\bar{h} = 0$, $\bar{h} = 0,5$, $\bar{h} = 1,0$	$(P_S)_{max} / 2$
4_3	$\bar{h} = 0$, $\bar{h} = 0,5$, $\bar{h} = 1,0$	$3(P_S)_{max} / 4$

В результате CFD-исследований установлено, что при S-образной форме средней линии профиля уменьшается угол отставания на выходе из решетки. Это изменение тем значительнее, чем больше параметр P_S . Вместе с тем при фиксированной величине $\bar{C}_{1a}$ увеличивается фактор диффузорности D , что приводит к изменению распределения коэффициента потерь в решетке РК по высоте.

Следует отметить, что полученные результаты по распределению коэффициента потерь (рис. 4) неоднозначны и нуждаются в дальнейшей экспериментальной проверке.

На втором этапе решалась задача определения угла отставания потока на выходе из решетки РК с S-образной формой средней линии лопаточных венцов при угле атаки, близком к оптимальному.

Для получения зависимости угла отставания от геометрических параметров РК использовался ортогональный центральный композиционный план (ЦКП) [17].

Варьируемыми параметрами при этом являлись: параметр P_S , который изменялся в пределах $P_S = (0,06 \div 0,34)$; величина прогиба средней линии сечения профиля $\bar{X}_f$, ($\bar{X}_f = (0,40 \div 0,50)$), угол потока на входе в решетку $\beta_{1п}$, $\beta_{1п} = (33 \div 43)^\circ$, параметр вращения $\omega^2 R$, $\omega^2 R = (2,29 \div 3,29) \cdot 10^6$.

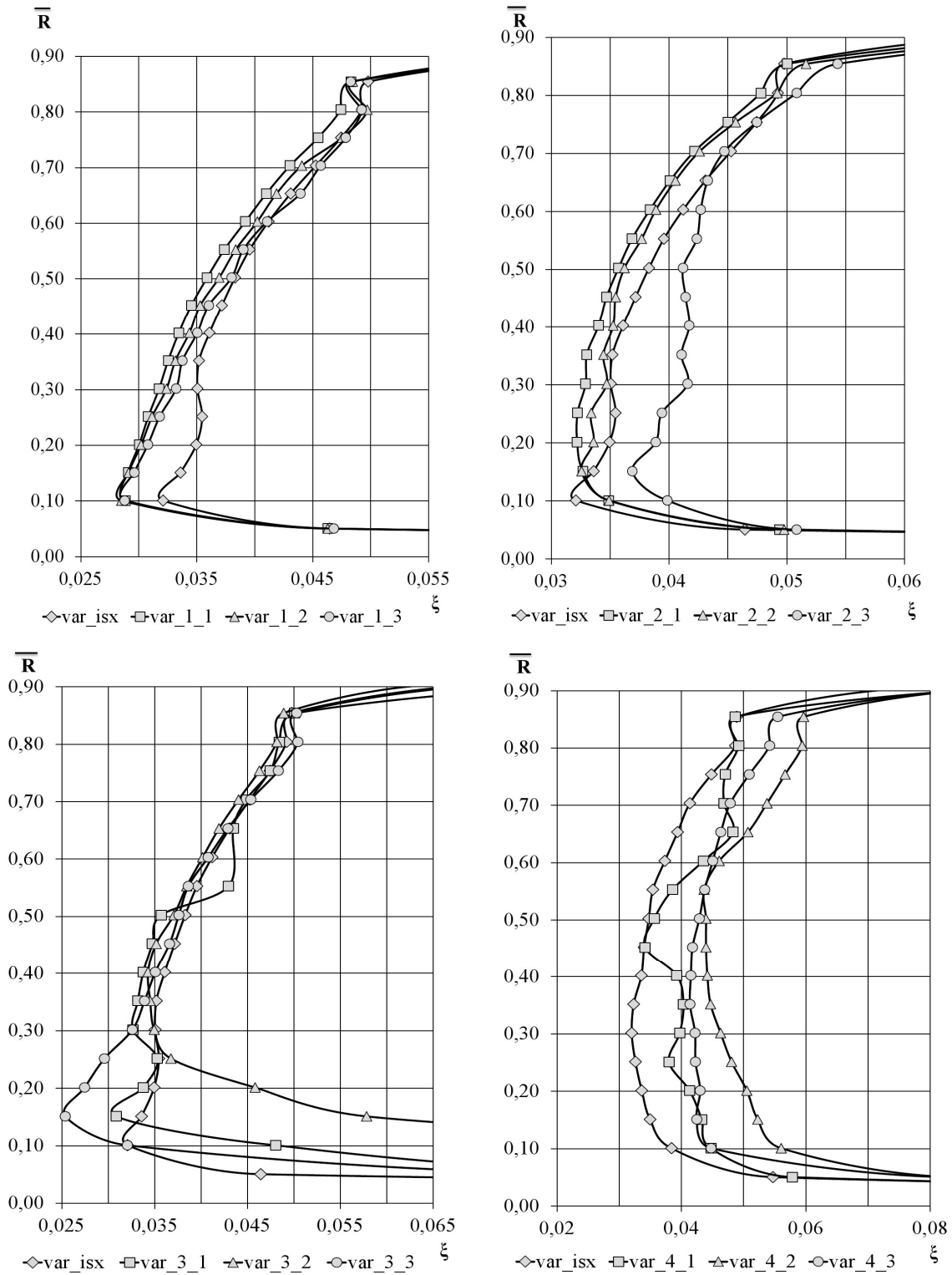


Рис. 4. Распределение коэффициента потерь по высоте вдоль профиля пера лопатки РК по высоте для различных вариантов распределения параметра P_s

При оценке угла отставания использовалась зависимость [18]:

$$\delta = \delta_0 + \frac{m}{(b/t)^b} \cdot \theta, \quad (6)$$

где δ_0 – угол отставания при нулевом изгибе профиля, θ – угол изгиба профиля, b – коэффициент,

зависящий от угла входа потока, при этом величинам δ_0 и b соответствует данные [18], а для нахождения коэффициента m использовался регрессионный анализ. После определения коэффициентов уравнения регрессии была получена аппроксимационная математическая модель для оценки коэффициента m во вращающейся S-образной решетке РК.

$$\begin{aligned}
m = & 0,043 \beta_1 + 0,0259\omega^2 R - 0,733(P_S + \overline{X_f}) - (0,229P_S - 0,046)(20\overline{X_f} - 9) - (7,143P_S - 1,429)(0,121P_S - 0,024) + \\
& + (0,0345P_S - 0,007)\left(\frac{\beta_1 - 38}{5}\right) - (2\omega^2 R - 5,581)(0,034\omega^2 R - 0,095) - (20\overline{X_f} - 9)(0,082\overline{X_f} - 0,037) - \\
& - (0,004\beta_1 - 0,147)\left(\frac{\beta_1 - 38}{5}\right) - (0,005\beta_1 - 0,186)(2\omega^2 R - 5,581) + (0,032P_S - 0,006)(2\omega^2 R - 5,581) + \\
& + (0,208\overline{X_f} - 0,094)\left(\frac{\beta_1 - 38}{5}\right) + (0,252\overline{X_f} - 0,113)(2\omega^2 R - 5,581) - 0,492.
\end{aligned} \quad (7)$$

Количественная оценка коэффициента m в S-образной вращающейся решетке РК с использованием полученной модели (7) приведена на рис. 5. При S-образной форме средней линии профиля уменьша-

ется угол отставания на выходе из решетки (рис. 6). Это изменение тем значительнее, чем больше степень S-образности, вместе с тем при этом увеличивается фактор диффузорности (рис. 7).

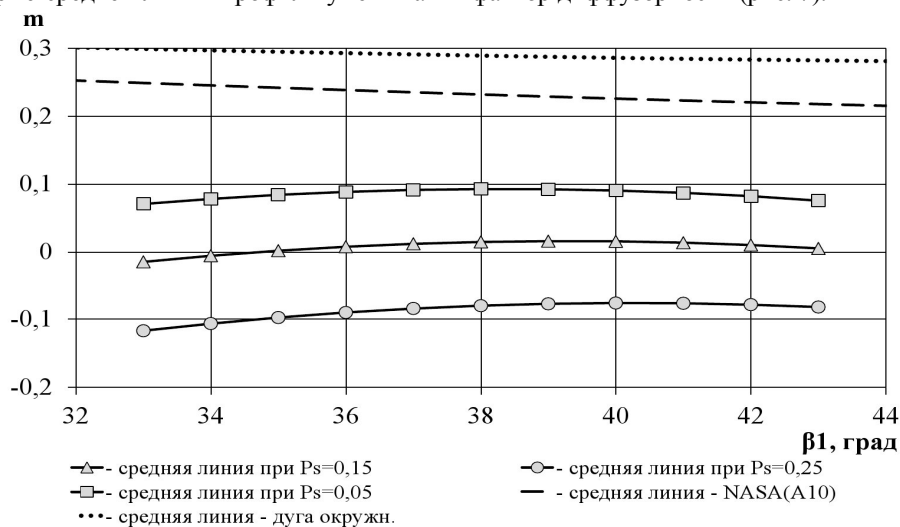


Рис. 5. Зависимость коэффициента m для среднего сечения РК угла входа потока

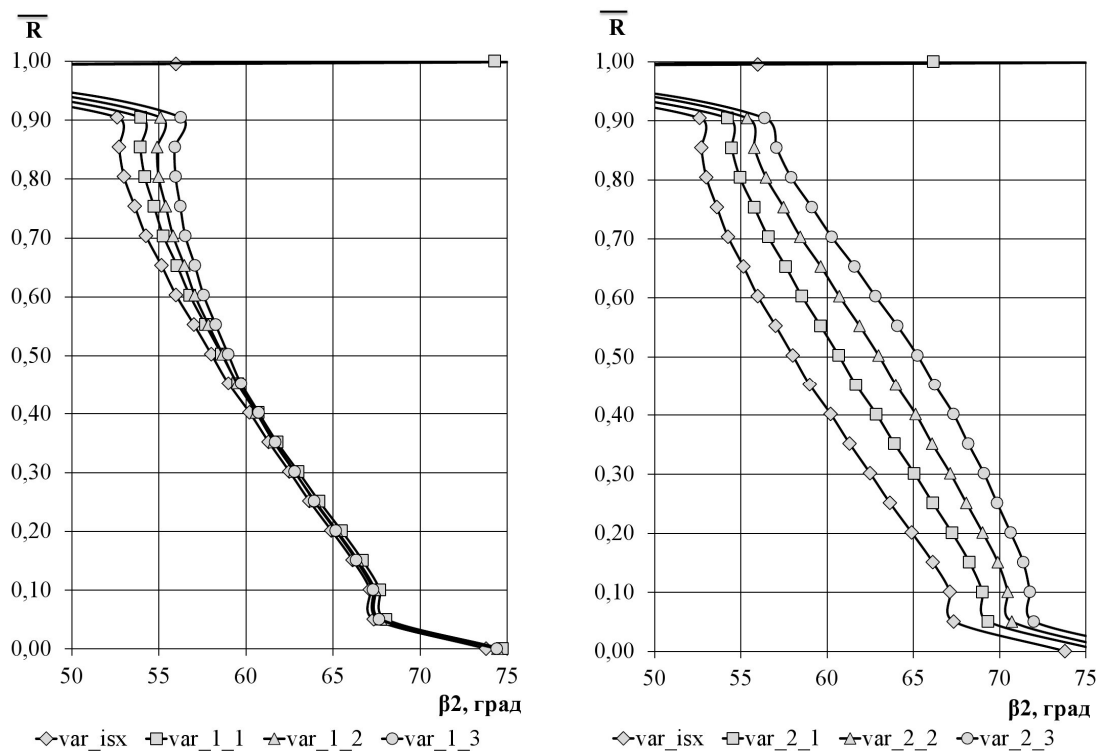


Рис. 6. Распределение угла выхода потока по высоте вдоль профиля пера лопатки РК по высоте для различных вариантов распределения параметра P_S

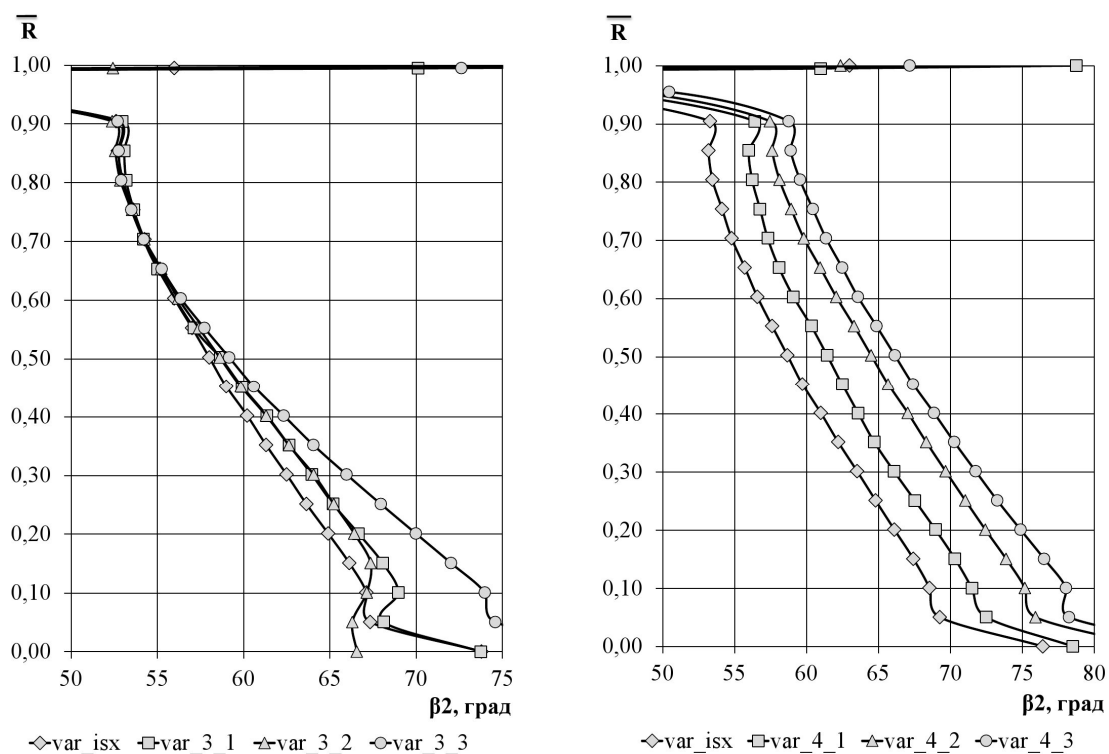


Рис. 6. Распределение угла выхода потока по высоте вдоль профиля пера лопатки РК по высоте для различных вариантов распределения параметра P_s (окончание)

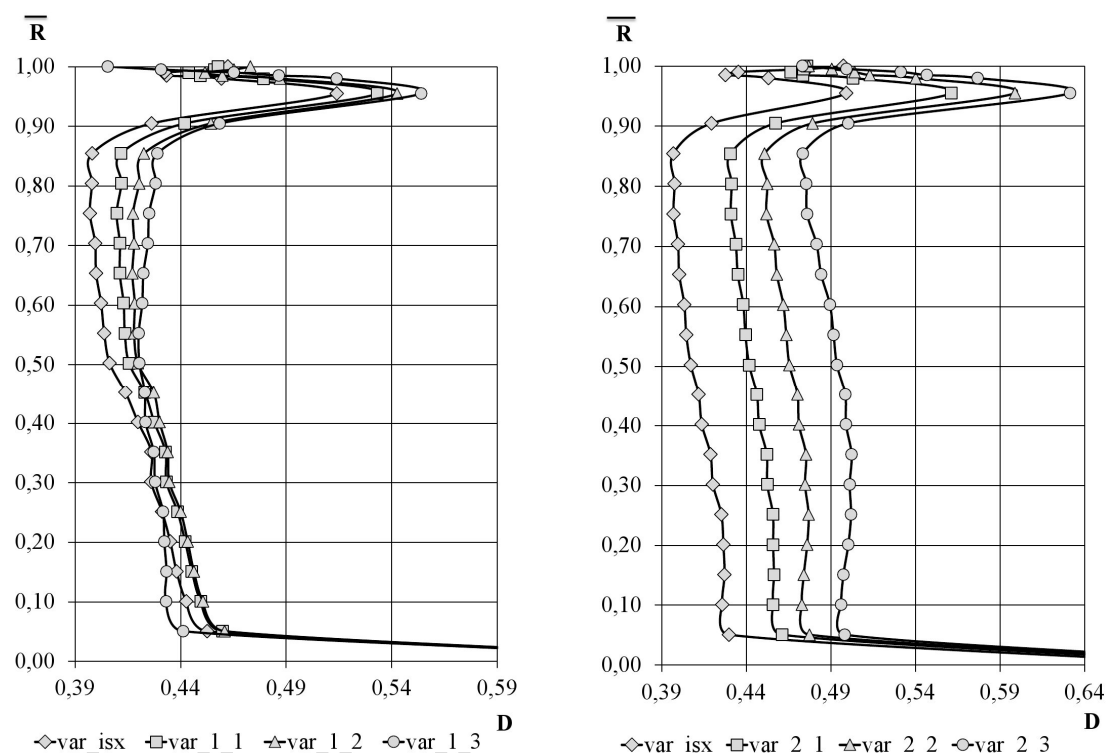


Рис. 7. Распределение коэффициента D по высоте вдоль профиля пера лопатки РК по высоте для различных вариантов распределения параметра P_s

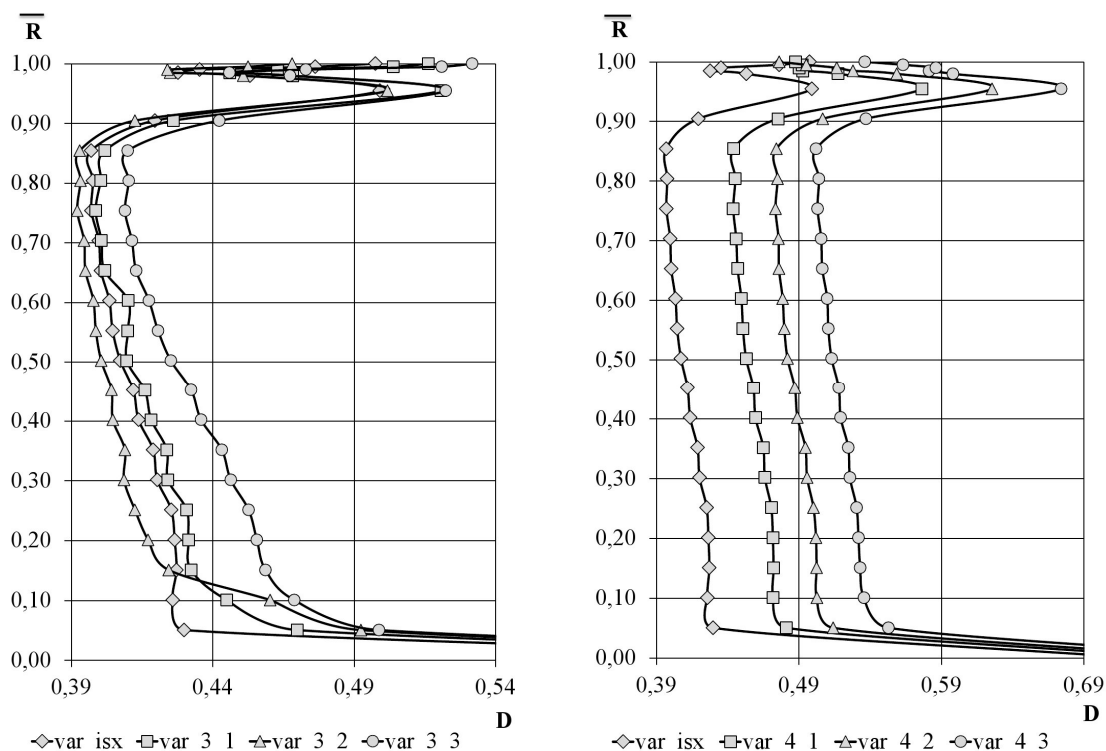


Рис. 7. Распределение коэффициента D по высоте вдоль профиля пера лопатки РК по высоте для различных вариантов распределения параметра P_s

Расчетная зависимость коэффициента потерь от фактора диффузорности для среднего сечения исследуемой решетки при введении параметра P_s для ско-

ростей $M_1 \leq 0,65$ приведены на рис. 8, в сопоставлении с данными [1].

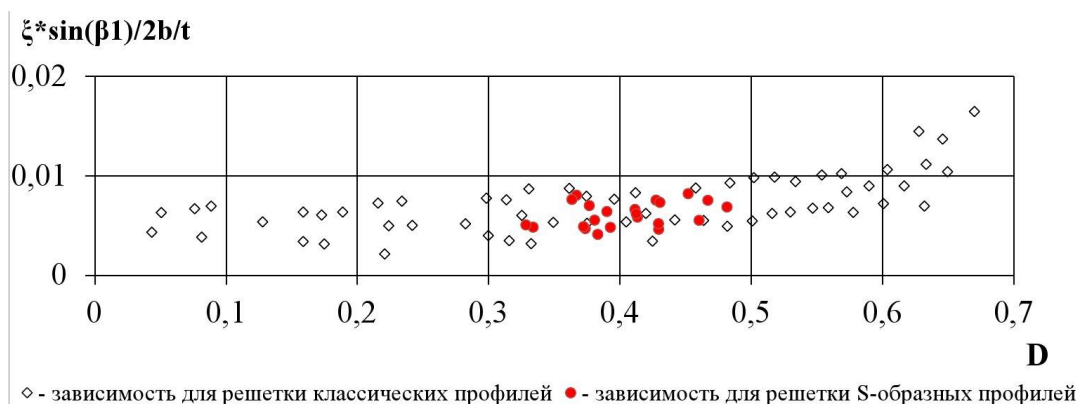


Рис. 8. Зависимость величины $(\xi \sin \beta_1 / 2b / t)$ для среднего сечения РК от фактора диффузорности

5.2. Анализ влияния навала профиля пера лопатки на характеристики компрессорной решетки

Для средней ступени КВД (рис. 3) было выполнено численное исследование характеристик лопаточных венцов РК и НА при изменении окружного навала лопаток θ_{2i} (рис. 2), отдельно в каждом из них. Рассматривалась работа ступени при равномерном поле параметров на входе, для фиксированного расчетного режима работы ступени (см. п. 5.1).

Во всех исследованных конфигурациях навала профиля пера лопатки РК (рис. 9) наблюдается изменение поля параметров в концевых областях, в частности в области радиального зазора. Коэффициент потерь (8) в этих зонах возрастает при увеличении параметра θ_{2i} (в случае выпуклой стороны разрежения профиля)

Вместе с тем, с ростом θ_{2i} уменьшается степень сжатия в средней части решетки, происходит перераспределение поля параметров по высоте. При уменьшении θ_2 наблюдается тенденция к снижению

коэффициента потерь в области радиального зазора. В средней части решетки уменьшение коэффициента потерь незначительно (рис. 10):

$$\xi = \frac{\Delta P^*}{(\rho_1 \cdot W_1^2) / 2} \quad (8)$$

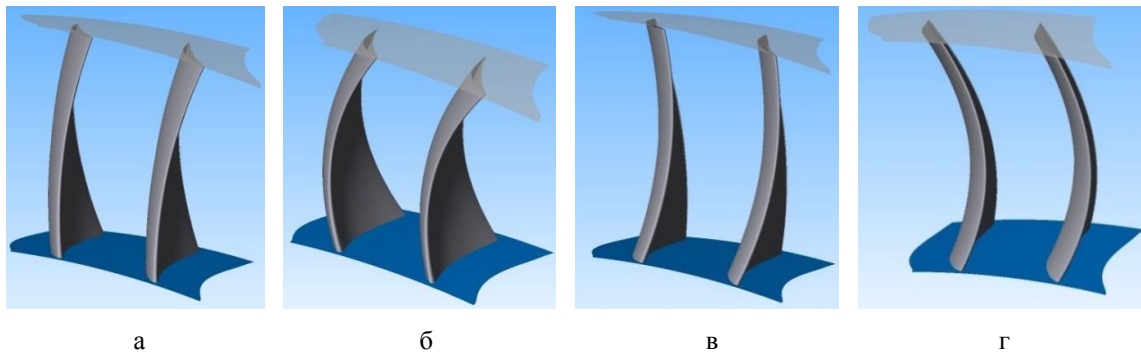


Рис. 9. Вид лопаток РК: а – $\theta = 1,5^\circ$; б – $\theta = 3^\circ$; в – $\theta = -1,5^\circ$; г – $\theta = -3^\circ$

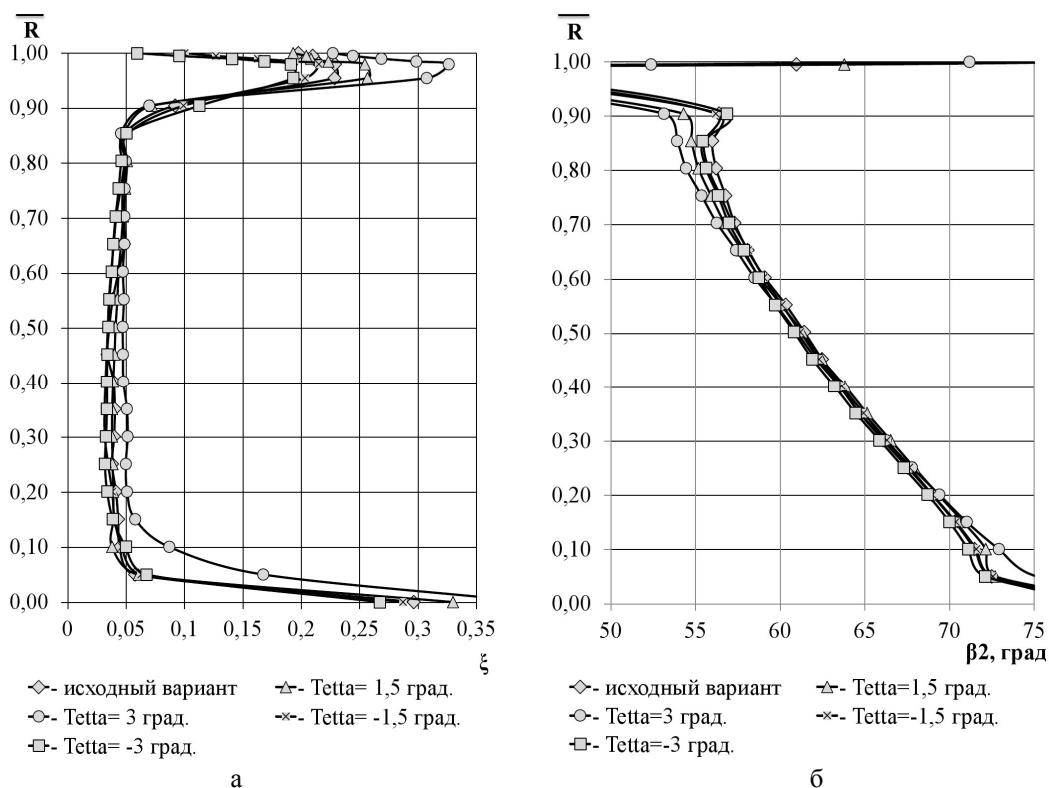


Рис. 10. Распределение коэффициента потерь (а) и угла выхода потока (б) в лопаточном венце РК по высоте лопатки

При исследовании влияния формы навала профиля пера лопатки НА (рис. 11) на изменение поля параметров по высоте проточной части выявлена тенденция к существенному (более интенсивному, по сравнению с РК) росту неравномерности в концевых областях при выпуклой форме спинки профиля (уменьшении параметра θ_{2i} для НА). При уменьшении θ_{2i} коэффициент потерь увеличивается как в концевых областях (рис. 12), так и в средней части решетки. В случае выпуклой стороны разрежения профиля коэффициент потерь увеличивается на (20-40)%. При вогнутой стороне разрежения профиля, значение осред-

ненного по высоте коэффициента потерь в лопаточных венцах уменьшается на 8-10%, при этом в средней части профиля пера лопатки НА выявлено уменьшение (на 10%) коэффициента потерь при значении параметра $\theta_{2i} = 3^\circ$. В периферийной области на выходе из решетки происходит уменьшение угла отставания потока на $(1 - 1,5)^\circ$.

Распределение осредненного по высоте коэффициента потерь в лопаточных венцах РК и НА при изменении навала профиля пера лопатки показано на рис. 13. Распределение фактора диффузорности по Либляйну в лопаточном венце РК и НА по высоте лопатки показано на рис. 14.

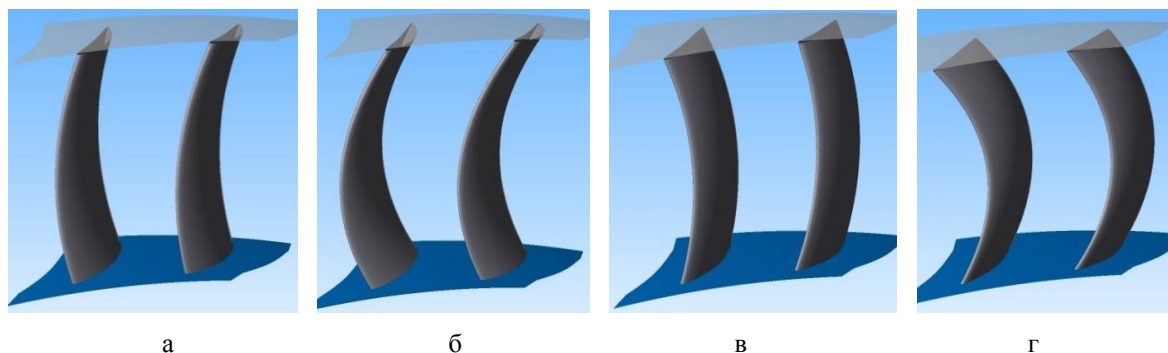
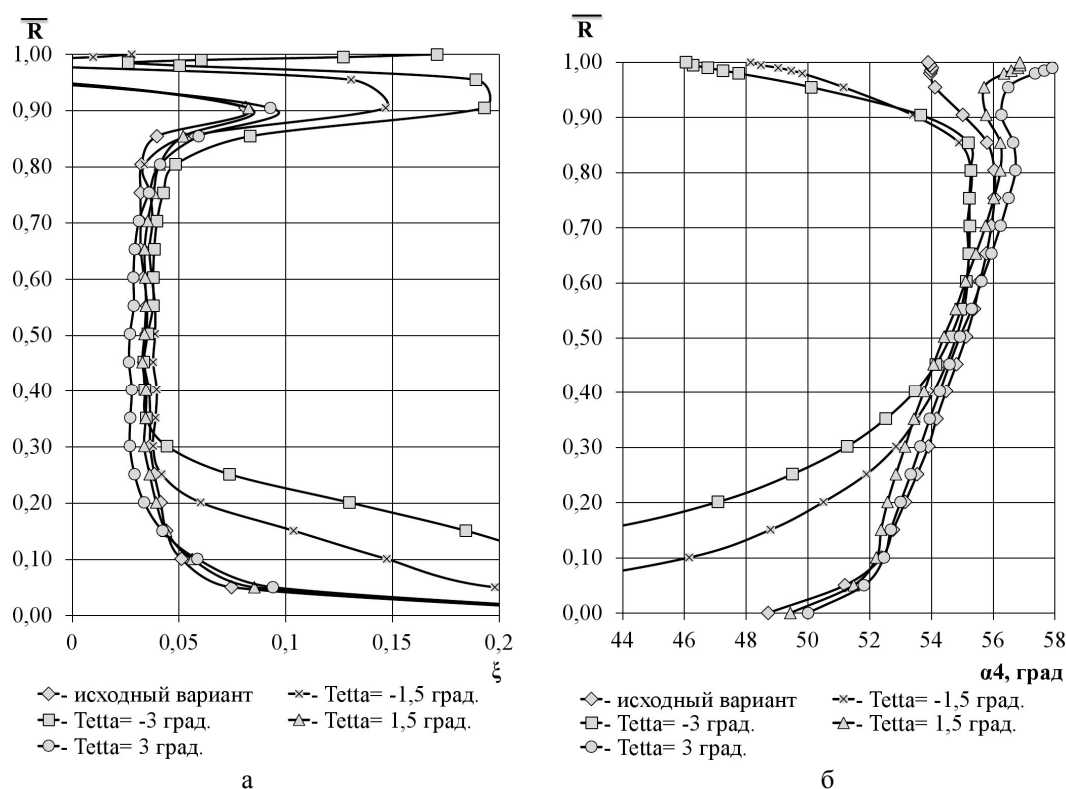
Рис. 11. Вид лопаток НА: а – $\theta = 1,5^\circ$; б – $\theta = 3^\circ$; в – $\theta = -1,5^\circ$; г – $\theta = -3^\circ$ 

Рис. 12. Распределение коэффициента потерь (а) и угла выхода потока (б) в лопаточном венце НА по высоте лопатки

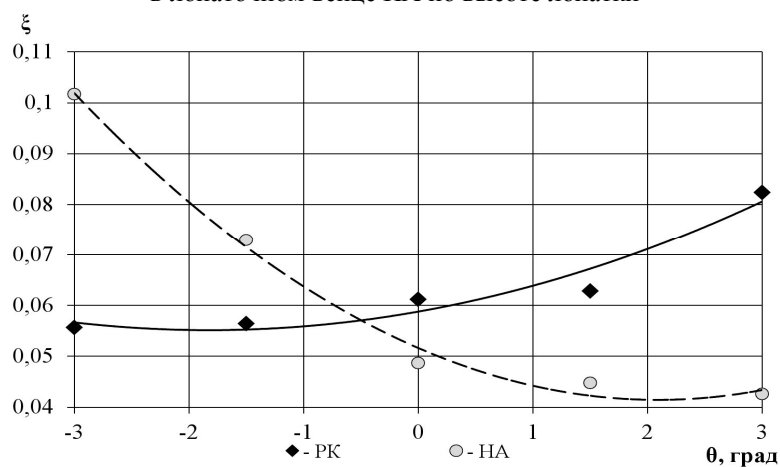


Рис. 13. Распределение осредненного по высоте коэффициента потерь в лопаточных венцах РК и НА при изменении навала профиля пера лопатки

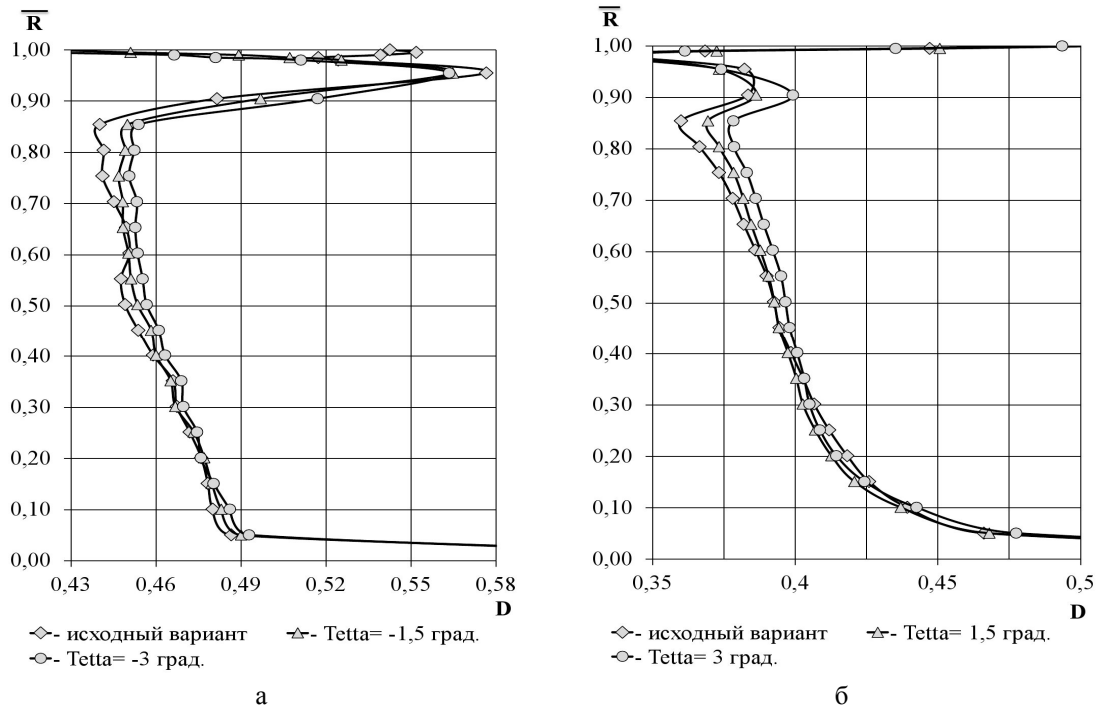


Рис. 14. Распределение фактора диффузности по Либляйну в лопаточном венце РК (а) и НА (б) по высоте лопатки

Заключение

1. Предложен метод формирования геометрии лопаточных венцов компрессорной решетки при введении окружного навала и S-образности профиля пера лопатки.
2. Получена новая модель для определения угла отставания потока во вращающейся решетке РК с S-образной формой средней линии, с учетом густоты, угла изгиба профиля, угла входа потока.
3. Показано, что при S-образной форме средней линии профиля уменьшается угол отставания на выходе из решетки. Это изменение тем значительнее, чем больше степень S-образности, вместе с тем при этом увеличивается фактор диффузности.
4. Установлено, что при введении окружного навала лопаток РК и НА, при вогнутой стороне разрежения профиля, коэффициент потерь в лопаточных венцах уменьшается на (8-10)%. В случае выпуклой стороны разрежения профиля коэффициент потерь увеличивается на (20-40)%.
5. Положительный эффект при введении навала достигается преимущественно за счет улучшения структуры течения в концевых областях. Для решетки НА при вогнутой стороне разрежения профиля выявлено уменьшение угла отставания в периферийной области на $(1 \div 1,5)^\circ$.

Благодарность

Автор выражает благодарность начальнику сектора газодинамики отдела компрессоров ГП

НПКГ «Зоря»-«Машпроект» М.А. Шаровскому, доктору технических наук, профессору В.П. Герасименко (ХАИ) за полезное обсуждение работы.

Литература

1. Холицевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К.В. Холицевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 452 с.
2. Кампсти, Н. Аэродинамика компрессоров [Текст] / Н. Кампсти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
3. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст]: моногр. / А.В. Бойко, Ю.Н. Говоруценко, С.В. Еришов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
4. Герасименко, В.П. Аэродинамическая оптимизация рабочего колеса компрессора [Текст] / В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №10/77. – С. 46-48.
5. The Design, Development and Evaluation of 3D Aerofoils for High Speed Axial Compressors [Text] / D. Lippett, G. Woollatt, P. Ivey, P. Timmis, B. Charnley // ASME paper GT2005-68792. – 26 p.
6. Петровичев, А.М. Влияние окружного изгиба лопаток направляющего аппарата на характеристики ступени осевого компрессора [Текст] / А.М. Петровичев, Н.М. Савин, С.А. Смирнов // Лопаточные машины и струйные аппараты. Вып. 12. – М.: Машиностроение. – 1990. – С. 29-42.
7. Расчётно-экспериментальные исследования модели высоконагруженной типовой средней ступени

пени высоконапорного КВД [Текст] / В.И. Милешин, И.К. Орехов, С.В. Панков, Е.И. Степанов // *Авиадвигатели XXI века: материалы конференции* – М.: ЦИАМ, 2010. – С. 211-215.

8. Расчетное исследование течения в ступени осевого компрессора с окружным изгибом лопаток направляющего аппарата [Текст] / А.Б. Богод, А.М. Петровичев, Н.М. Савин, С.А. Смирнов // *Лопаточные машины и струйные аппараты*. Вып. 12. – М.: Машиностроение. – 1990. – С. 7-17.

9. Брейгельманс. Влияние окружного навала лопаток на вторичное течение в плоской компрессорной решетке [Текст] / Брейгельманс, Каралс, Демют // *Энергетические машины и установки*. – 1984. – №3. – С. 30-36.

10. Герасименко, В.П. Эффекты радиального зазора в турбомашинах [Текст] / В.П. Герасименко, Е.В. Осипов, М.Ю. Шелковский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – №8/16. – С. 51-58.

11. Василенко, С.Е. Влияние формы средней линии профилей на потери в концевых областях прямых компрессорных решеток [Текст] / С.Е. Василенко, В.В. Огнев, Р.З. Тумашев // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 1987. – №2. – С. 76-79.

12. Василенко, С.Е. Совершенствование КНД ГПА 25 применением специального профилирования последних ступеней компрессора [Текст] / С.Е. Василенко, В.Е. Спицын, М.А. Шаровский // *Судовое и энергетическое машиностроение, т.1. Николаев: НПКТ “Зоря”-“Машпроект”*. – 2004. – №3. – С. 107-112.

13. Расчетно-экспериментальное исследование осецентрированного компрессора со специальным профилированием лопаточных венцов [Текст] / М.А. Шаровский, М.Ю. Шелковский, Е.А. Токарева, А.В. Ивченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – №9 (76). – С. 34-40.

14. Комиссаров, Г.А. Методика газодинамического расчета осевого компрессора [Текст] / Г.А. Комиссаров, В.М. Микиртичан, М.В. Хайт. – М.: Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова ЦИАМ, 1961. – 132 с.

15. ANSYS CFX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+CFX>. – 31.05.2012 г.

16. Расчет суммарных газодинамических характеристик компрессоров по идентифицированной модели с использованием CFD-технологий [Текст] / В.Е. Спицын, М.А. Шаровский, А.В. Ивченко, Е.А. Токарева, М.Ю. Шелковский // *Современные технологии в газотурбостроении*. – 2009. – №4/5 (40). – С. 37-41.

17. Герасименко, В.П. Математические методы планирования испытаний воздушно-реактивных двигателей [Текст]: учеб. пос. / В.П. Герасименко. – Х.: ХАИ, 1982. – 105 с.

18. Степанов, Е.И. Расчеты течения в турбомашинах [Текст] / Е.И. Степанов. – М.: Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова ЦИАМ, 1986. – 196 с.

Поступила в редакцию 31.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой В.Д. Борисенко, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.

ПАРАМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТОК

М.Ю. Шелковський

У роботі розглянуті питання формування геометрії лопаткових вінців компресорної решітки при введенні окружного навала і S-образності профілю пера лопатки. Представлений розрахунковий CFD-аналіз характеристик таких компресорних решіток, виконаний за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX 12.1. Отримано нові розрахункові залежності для кута відставання в обертовій решітці робочого колеса з S-подібною формою середньої лінії, від кута вигину профілю і кута входу потоку. Показаний характер розподілу деяких аеродинамічних характеристик по висоті проточної частини при введенні різних форм навала лопаток робочого колеса і направляючого апарату, за результатами CFD-розрахунків.

Ключові слова: компресор, профіль пера лопатки, кут відставання, середня лінія, навал, робоче колесо, направляючий апарат, характеристика, коефіцієнт корисної дії.

PARAMETRIC RESEARCH OF GASDYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPRESSOR CASCADES

M.Y. Shelkovsky

The questions of geometry forming of compressor blade vanes with circuit bending and S-shape middle line are considered. The calculation CFD-analysis of characteristics of such compressor cascades, executed through a program complex ANSYS CFX 12.1, is presented. New calculation dependences are got for the deviation angle in the impeller with the S-shape camber line, of the bending profile angle and the angle of the entrance flow. Shows the distribution of some of the aerodynamic characteristics of the height of the flow with the introduction of various forms of blades of impeller and guide vanes circuit bending, as a result of CFD-calculations.

Key words: compressor, blade profile, deviation angle, middle line, circuit bending, impeller, guide vane, characteristic, efficiency.

Шелковский Михаил Юрьевич – инженер 2 категории сектора газодинамики отдела компрессоров ЦНИОКР «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.