

УДК 621.515

М. Ю. ШЕЛКОВСКИЙ

“Зоря”-“Машипроект” ГП НПКГ, Украина

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТОК С ”УПРАВЛЯЕМОЙ” ДИФFUЗОРНОСТЬЮ

*В данной работе предложены новые зависимости для определения угла отставания и коэффициента потерь в дозвуковых компрессорных решетках профилей с “управляемой” диффузорностью. Характерной их особенностью являлась S-образная форма средней линии. Получение таких зависимостей выполнялось по результатам испытаний нескольких многоступенчатых компрессоров, а также расчетов трехмерного вязкого течения в их проточной части с помощью программного комплекса ANSYS CFX. Рассмотрены основные результаты определения характеристик компрессорных решеток различной геометрии с “управляемой” диффузорностью, приведены коэффициенты детерминации полученных зависимостей.*

**Ключевые слова:** компрессор, управляемая диффузорность, средняя линия, угол отставания, коэффициент потерь.

### Введение

Повышение эффективности многоступенчатых осевых компрессоров на сегодняшний день выполняется путем совершенствования структуры течения в их проточной части, на основе расчетных и экспериментальных исследований [1]. Для достижения высоких значений КПД ступеней приходится учитывать практически все источники потерь. Трудность моделирования реальных течений на стендах, высокая стоимость экспериментов и сложность измерений приводят к широкому распространению методов и моделей расчета трехмерного вязкого течения при решении прямой и обратной задачи. Вместе с тем, при пространственном профилировании лопаточных венцов изменяются их характеристики, что требует учета на этапе проектирования.

Наряду с использованием трехмерных подходов, при проектировании лопаточных венцов широко применяются двумерные и квазитрехмерные методы расчета течения на основе большого количества статистических данных, основным преимуществом которых является ускоренное получение решения. Необходимым элементом расчетов при этом являются полуэмпирические зависимости для определения основных параметров (угол поворота потока, коэффициенты потерь полного давления, качество профиля), полученные, как правило, в результате продувок элементарных плоских решеток в аэродинамических трубах, при заданных числах  $M$  и  $Re$  [2]. Обобщения этих экспериментов можно найти в работах Хоуэлла [3], Бунимовича [4], Комарова [5] и др. Основными характеристиками решеток профилей

на поверхностях тока  $S_1$ , являются зависимости углов отставания и коэффициентов потерь от геометрических и аэродинамических переменных [1-5].

### 1. Постановка задачи

Для определения угла отставания потока на выходе из решетки профилей осевого компрессора широко используют соотношения, приведенные в работах [1-5] и др. Вместе с тем, большинство существующих соотношений полуэмпирические, основанные на данных продувок изолированных стационарных плоских решеток, без учета характера потока перед лопаточными венцами. Поэтому, используемые обычно статистические данные по двумерным решеткам профилей, требуют уточнения при 3D-моделировании. Неясной остается возможность применения подобных зависимостей для компрессорных решеток с пространственным профилированием лопаточных венцов рабочих колес (РК) и направляющих аппаратов (НА) с “управляемой” диффузорностью межлопаточных каналов, S-образным профилированием лопаток [6]. Расширение списка переменных и границ изменения их диапазона может быть получено в натуральных экспериментах.

При проектировании лопаточных венцов компрессоров используются различные коэффициенты, характеризующие гидравлическое сопротивление течения в диффузорных каналах на различных режимах обтекания [2]. Установленная Либляйном связь между параметром относительной нагрузки - фактором диффузорности, параметрами пограничного слоя на выходной кромке профиля и профиль-

ными потерями [7] широко применяется при проектировании компрессоров. Расширение диапазона ее применимости получают с учетом сжимаемости потока при высоких числах  $M$ , изменения площади трубок тока на входе и выходе из венца, при произвольной форме профиля, изменении режима работы. Однако неясной остается возможность применения существующих соотношений для лопаточных венцов с “управляемой” диффузорностью, в частности S-образным профилированием лопаток [6].

В связи с тем, что течение в компрессоре более сложное, чем в изолированном венце - трехмерное, вязкое, нестационарное и т.д. [1], для повышения точности оценок углов отставания требуется учет потерь, связанных с эффектами взаимодействия сечений по высоте лопатки, а также нестационарностью из-за наличия следов в набегающем потоке за лопатками предыдущих лопаточных венцов. Предполагаемым приемом учета пространственной формы потока могут быть исследования (экспериментальные и расчетные) в системе многоступенчатого компрессора.

## 2. Решение задачи

Соотношения по величинам потерь и углов отставания потока получали в результате обобщения данных, полученных по замерам в межвенцовых зазорах в ходе испытаний нескольких многоступенчатых компрессоров [8-10], лопаточные венцы которых спрофилированы по методике “управляемой” диффузорности [6] и отличаются S-образностью профилей. Обработку результатов эксперимента выполняли в широком диапазоне углов атаки на входе в решетки РК (НА), на различных радиусах. Относительная погрешность определения массового расхода воздуха при испытаниях составляла  $\delta G = \pm 0,8\%$ ; степени повышения давления  $\delta \pi_k^* = \pm 1,0\%$ ; КПД компрессоров:  $\delta \eta_{ад}^* = \pm 1,0\%$ .

Газодинамические параметры по высоте лопаточных венцов определяли последовательным итерационным приближением для каждого сечения методом балансировок, описанным в работах [8, 9]. Значения оптимальных углов атаки определяли по минимуму коэффициента потерь характеристик  $\delta = f(i)$ ,  $\xi = f(i)$  для различных сечений по высоте лопаточных венцов. При получении данных зависимостей, кроме результатов обработки экспериментальных данных, также использовали результаты CFD-расчетов по трехмерной вязкой задаче ANSYS CFX (выбор численной схемы, густоты сеточного разбиения, модели турбулентности рассмотрены в работах [9, 11]).

Для определения углов отставания потока  $\delta_{PK}$

( $\delta_{НА}$ ) в дозвуковых решетках РК и НА при оптимальном угле атаки использовали следующие зависимости [12]:

$$\delta_{PK} = K_{\phi} K_{\delta c} \delta_{10 PK} + \frac{m_{PK} \cdot K_{\delta f PK}}{(b/t)_{PK}^{\mu_{PK}}} \theta_{PK} \cdot \bar{\delta} - 0,5, \quad (1)$$

$$\delta_{НА} = K_{\phi} K_{\delta c} \delta_{10 НА} + \frac{m_{НА} \cdot K_{\delta f НА}}{(b/t)_{НА}^{\mu_{НА}}} \theta_{НА} - 0,5, \quad (2)$$

где  $b/t$  - густота решетки,  $\theta$  - угол изгиба профиля РК (НА). Поправочный коэффициент  $\bar{\delta}$  определяли по величине относительного втулочного диаметра на входе в РК ( $\bar{d}$ ) и отношению осевых составляющих скоростей перед и за РК [13]:

$$\bar{\delta} = \begin{cases} \frac{1,655 \cdot (\bar{d} - 0,4)}{C_{2a} - 0,45} - 2,86 \cdot \bar{d} + 2,145, & \text{при } 0,4 < \bar{d} < 0,75, \\ \frac{0,58}{C_{2a} - 0,45} & \text{при } \bar{d} \geq 0,75. \end{cases} \quad (3)$$

Величины  $\delta_{10 PK}$ ,  $\delta_{10 НА}$  определяли по зависимостям, приведенным в работе [2]. Величину  $\mu_{PK}$  определяли по соотношению [12]:

$$\mu_{PK} = 1,35 \cdot \left( \frac{\beta_1}{100} \right)^3 - 3,125 \cdot \left( \frac{\beta_1}{100} \right)^2 + 2,646 \cdot \left( \frac{\beta_1}{100} \right) + 0,135, \quad (4)$$

где  $\beta_1$  - угол потока на входе в решетку РК.

Коэффициент  $K_{\delta f PK}$  учитывает влияние расположения максимальной вогнутости средней линии профиля:

$$K_{\delta f PK} = 1 + \frac{0,23}{0,41 - 0,002 \cdot \beta_2} \cdot [(2 \cdot \bar{X}_{f PK})^2 - 1], \quad (5)$$

где  $\beta_2$  - угол потока на входе из решетки РК.

Величины  $\mu_{НА}$ ,  $K_{\delta f НА}$  вычисляли по зависимостям (4)-(5), с соответствующей заменой  $\beta_1$  ( $\beta_2$ ) на  $\alpha_3$  ( $\alpha_4$ ). Коэффициент  $K_{\phi} = 1$  (принимали), а коэффициент  $K_{\delta c}$  определяли по относительной максимальной толщине профилей РК (НА) [12]:

$$K_{\delta,c} = 142 \cdot \bar{C}_{\max}^3 + 9,34 \cdot \bar{C}_{\max}^2 + 7,646 \cdot \bar{C}_{\max}. \quad (6)$$

Для определения коэффициентов  $m_{PK}$  ( $m_{HA}$ ) были установлены новые соотношения:

$$m_{PK} = m_{sPK} \cdot (1 + \bar{P}_s)^2 + [3,48 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta_{PK})^3 - 7,35 \cdot 10^{-4} \cdot (\theta_{PK})^2 + 0,0485 \cdot \theta_{PK} - 0,886], \quad (7)$$

где  $\bar{P}_s$  - параметр S-образности [14],

$$m_{sPK} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta_1)^2 - 0,0197 \cdot (\beta_1) + 0,68. \quad (8)$$

Величины  $m_{HA}$ ,  $m_{sHA}$  вычисляли по зависимостям (7)-(8), с соответствующей заменой  $\theta_{PK}$  и  $\beta_1$  на  $\theta_{HA}$  и  $\alpha_3$ . Зависимость коэффициента  $m_s$  от угла потока на входе показана на рис. 1.

Оптимальные углы атаки на входе в решетки РК и HA определяли по соотношениям [11]:

$$i_{0PK} = (K_{\phi} \cdot K_{i,c,PK} \cdot i_{10,PK} + \theta_{PK} \cdot n_{PK} \cdot K_{i,f,PK} - 1), \quad (9)$$

$$i_{0HA} = (K_{\phi} \cdot K_{i,c,HA} \cdot i_{10,HA} + \theta_{HA} \cdot n_{HA} \cdot K_{i,f,HA} - 1). \quad (10)$$

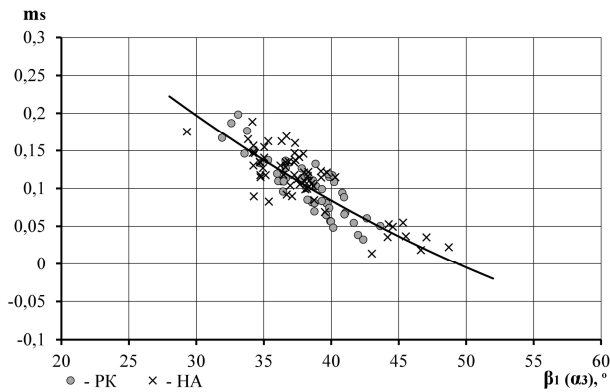


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $m_s$  от угла потока на входе в решетку РК (HA)

Коэффициент  $K_{\phi} = 1$  (принимали), величина  $i_{10,PK}$  соответствует неизогнутому профилю [2], а значения  $K_{i,c}$ ,  $K_{i,f}$  определяли для РК и HA по зависимостям [11]:

$$K_{i,c} = 18,217 \cdot \bar{C}_{\max} - 81,6861 \cdot \bar{C}_{\max}^2 - 237,3737 \cdot \bar{C}_{\max}^3 + 2320,075 \cdot \bar{C}_{\max}^4, \quad (11)$$

$$K_{i,f} = 1 + 1,6 \cdot [(\bar{X}_f) - 0,5]. \quad (12)$$

В результате обработки экспериментальных

данных получены новые соотношения для определения оптимальных углов атаки (рис. 2):

$$n_{PK} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta_1)^2 - 0,07 \cdot \beta_1 + 1,68, \quad (13)$$

$$n_{HA} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot (\alpha_3)^2 - 0,07 \cdot \alpha_3 + 1,68. \quad (14)$$

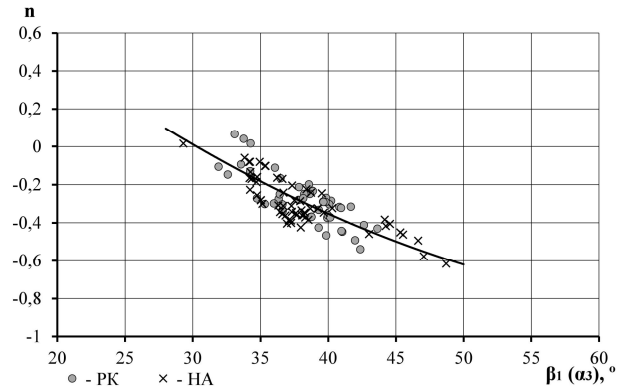


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $n$  от угла потока на входе в решетку РК (HA)

Вместе с тем, было установлено, что значения коэффициента  $n$  коррелируются с произведением  $(D^{0,6} \cdot \bar{X}_f)$ , где  $D$  - фактор диффузорности решетки РК (HA) [2] (рис. 3):

$$n = 7,784 \cdot (D^{0,6} \cdot \bar{X}_f)^2 + 0,705 \cdot (D^{0,6} \cdot \bar{X}_f) - 0,99. \quad (15)$$

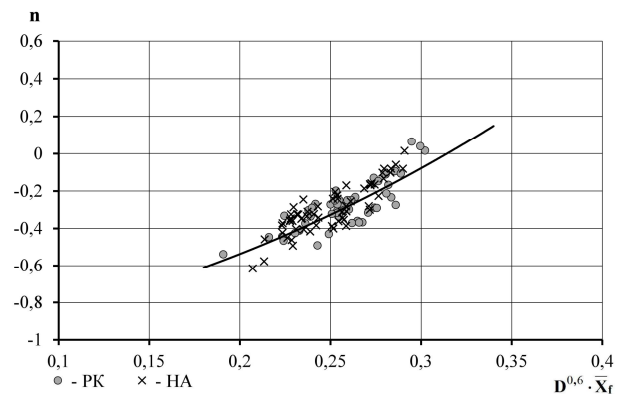


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $n$  от параметра  $(D^{0,6} \cdot \bar{X}_f)$  РК (HA)

Степень близости установленных аппроксимаций и экспериментальных данных оценивали коэффициентом детерминации  $R^2$ . Его значения для зависимостей, представленных на рис. 1-3, составляют  $R^2 = (0,8 \div 0,9)$ , что свидетельствует о высокой точности подбора уравнений регрессии. Адекватность полученных моделей была подтверждена критериями Стьюдента и Фишера.

Сопоставление характеристик лопаточных вен-

цов классического и S-образного профилирования упрощенно выполняли с использованием соотношений, приведенных в работе [2], при  $b/t = 1$ . Из анализа полученных результатов следует, что оптимальный угол атаки при S-образном профилировании, по сравнению с классическим, смещается в область меньших величин:

$$i = i_0 + 1,85 \cdot n \cdot \theta, \quad (16)$$

где  $i_0$  - оптимальный угол атаки в решетке пластин;  $\theta$  - угол изгиба профиля;  $n$  - коэффициент, характеризующий влияние угла изгиба на оптимальный угол атаки при классическом профилировании [2].

Выражение для угла отставания при оптимальном угле атаки в S-образной решетке профилей при  $b/t = 1$  будет иметь вид:

$$\delta = \delta_0 + 0,4 \cdot (1 + K_\theta) \cdot m \cdot \theta, \quad (17)$$

где  $\delta_0$  - оптимальный угол отставания в решетке пластин;  $\theta$  - угол изгиба профиля;  $m$  - коэффициент, характеризующий влияние угла изгиба на угол отставания при классическом профилировании, а величина  $K_\theta$  определяется по зависимости:

$$K_\theta = 0,00004 \cdot (\theta - 25)^3 - 0,004 \cdot (\theta - 25)^2 + 0,1336 \cdot (\theta - 25). \quad (18)$$

Таким образом, угол отставания потока при S-образном профилировании меньше, чем при классическом. При этом с понижением угла изгиба решетки разница между указанными углами увеличивается.

Характеристики компрессорных решеток РК и НА с S-образной формой средней линии при нерасчетных условиях оценивали с помощью обобщенной безразмерной характеристики Хоуэлла [3]. На рис. 4 показаны зависимости параметра  $\Delta\beta / \Delta\beta_{ном}$  от  $(i - i_{ном}) / \Delta\beta_{ном}$  (где  $\Delta\beta$  - угол поворота потока;  $\Delta\beta_{ном}$  - номинальный угол поворота потока,  $i$  - угол атаки;  $i_{ном}$  - угол атаки, обеспечивающий  $\Delta\beta_{ном}$ ) для решеток профилей с S-образной и со стандартной формой средней линии (в виде дуги окружности либо дуги гиперболы). Как видно, нерасчетные характеристики решеток профилей с различной формой средней линии (в т.ч. S-образной) мало отличаются между собой. В диапазоне характеристики  $\Delta\beta < \Delta\beta_{ном}$  угол отставания потока мало зависит от угла атаки.

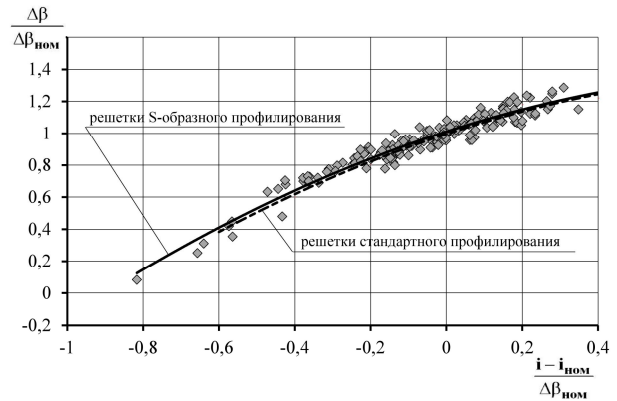


Рис. 4. Нерасчетные характеристики решеток профилей с различной формой средней линии

Зависимости коэффициента суммарных потерь в решетках профилей РК и НА с “управляемой” диффузорностью при оптимальных углах атаки приведены на рис.5 по параметрам  $\zeta \frac{\sin \beta_1}{2 \cdot b/t}$  (для РК) и

$\zeta \frac{\sin \alpha_3}{2 \cdot b/t}$  (для НА) для сечений по высоте проточной части  $\bar{h} = (0,3 \div 0,7)$ . Сопоставление полученных результатов с данными обобщений [2] (установленных при исследовании одноступенчатых осевых компрессоров стандартного профилирования) показывает, что уровень величин  $\zeta \frac{\sin \beta_1}{2 \cdot b/t}$  ( $\zeta \frac{\sin \alpha_3}{2 \cdot b/t}$ ) в

решетках профилей многоступенчатых компрессоров, спроектированных методом “управляемой” диффузорности ниже, чем в решетках стандартного профилирования [2]. При этом в данном случае учтены все составляющие потерь, в т.ч. потери, связанные с нестационарностью течения.

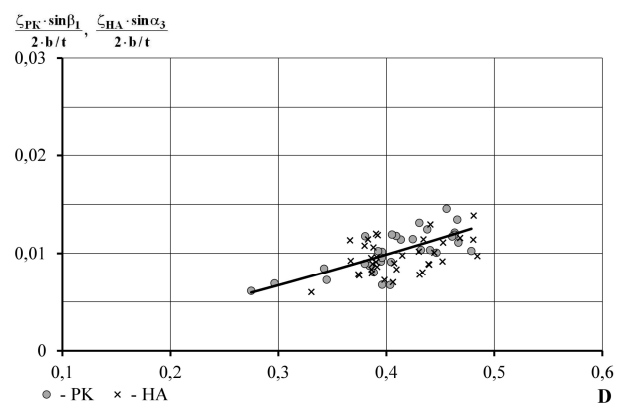


Рис. 5. Экспериментальные зависимости величин  $\zeta \frac{\sin \beta_1}{2 \cdot b/t}$  и  $\zeta \frac{\sin \alpha_3}{2 \cdot b/t}$  от фактора диффузорности решеток профилей РК и НА

Характеристика, приведенная на рис. 5 для РК, может быть представлена в виде зависимости, спра-

ведливой для диапазона  $M \leq 0,75$ ,  $D = (0,2 \div 0,5)$ :

$$\zeta_{PK} \frac{\sin \beta_1}{2 \cdot b/t} = 0,0422 \cdot D^2 + 0,0046 \cdot D + 0,001, \quad (19)$$

и аналогичной зависимостью для НА, с соответствующей заменой  $\beta_1$  на  $\alpha_3$ .

### Заключение

Впервые получены зависимости для определения углов отставания потока и коэффициентов потерь в дозвуковых компрессорных решетках профилей с S-образной формой средней линии, по результатам испытаний многоступенчатых компрессоров.

Выявлено влияние угла изгиба профиля, угла входа потока, степени S-образности на угол отставания потока в S-образных решетках профилей РК и НА. Угол отставания потока при S-образном профилировании меньше, чем при классическом, с понижением угла изгиба решетки разница между указанными углами увеличивается.

Установлены новые зависимости для определения влияния угла входа потока, относительного прогиба средней линии, степени диффузорности на оптимальный угол атаки в S-образных решетках профилей РК и НА. Оптимальный угол атаки при S-образном профилировании, по сравнению с классическим, смещается в область меньших значений.

Показана справедливость обобщенной безразмерной нерасчетной характеристики Хоуэлла для решеток S-образных профилей.

Полученные новые соотношения в дальнейшем целесообразно использовать при решении прямых и обратных задач компрессорных решеток с пространственным профилированием лопаточных венцов.

### Литература

1. Кампти, Н. *Аэродинамика компрессоров [Текст]: пер. с англ. / Н. Кампти.* – М.: Мир, 2000. – 688 с.
2. Холцевников, К. В. *Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холцевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин.* – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
3. Диксон, С. Л. *Механика жидкости и газов. Термодинамика турбомашин [Текст] / С. Л. Диксон.* – М.: Машиностроение, 1986. – 214 с.
4. Бунимович, А. И. *Обобщение результатов исследования плоских компрессорных решеток при дозвуковой скорости [Текст] / А. И. Бунимович,*

*А. А. Святогоров // Лопаточные машины и струйные аппараты. Вып. 2 – М.: Машиностроение. – 1967. – С. 36-66.*

5. Комаров, А. П. *Исследование плоских компрессорных решеток [Текст] / А. П. Комаров // Лопаточные машины и струйные аппараты. – Вып. 2 – М.: Машиностроение, 1967. – С. 67-110.*

6. *Исследование компрессорных решеток с управляемой формой средней линии профиля [Текст] / В. С. Бекнев, С. Е. Василенко, М. Ю. Сорочалетов, Р. З. Гумашев, М. А. Шаровский // Теплоэнергетика. – 1997. – № 4. – С. 38-42.*

7. Lieblein, S. *Loss and Stall Analysis of Compressor cascade [Text] / S Lieblein. // Transaction of the ASME, Journal of Enginiring for power. – Vol. 81. – 1959. – № 3. – P. 387-400.*

8. Шаровский, М. А. *Характеристики многоступенчатого компрессора со специальным профилированием лопаточных венцов [Текст] / М. А. Шаровский, Е. А. Токарева, М. Ю. Шелковский // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 3. – С. 56-61.*

9. *Расчетно-экспериментальное исследование осецентрибежного 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.*

10. Спицын, В. Е. *Компрессор со специальным профилированием лопаточных венцов [Текст] / В. Е. Спицын, М. А. Шаровский, М. Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 7(54). – С. 90-94.*

11. Шелковский, М. Ю. *Верификация программного комплекса ANSYS CFX для численного анализа трехмерного вязкого течения в компрессоре [Текст] / М. Ю. Шелковский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/10 (57). – С. 60-65.*

12. *Модуль газодинамического расчета осевого компрессора по средним параметрам ступеней для системы автоматизированного проектирования [Текст] / В. М. Микиртичан, В. С. Сазонова, В. Н. Тюленев, М. В. Хайт. – М.: Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова ЦИАМ. – 1978. – 255 с.*

13. 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.*

14. Шелковский, М. Ю. *Параметрическое исследование газодинамических характеристик компрессорных решеток [Текст] / М. Ю. Шелковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №7 (94). – С. 95-106.*

*Поступила в редакцию 9.12.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой турбин С. И. Сербин, Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова, г. Николаев.

### **ГАЗОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕСОРНИХ ГРАТ ІЗ "КЕРОВАНОЮ" ДИФУЗОРНІСТЮ**

*М. Ю. Шелковський*

У даній роботі запропоновано нові залежності для визначення кута відставання і коефіцієнта втрат в дозвукових компресорних гратах профілів з "керованою" дифузорністю. Характерною їх особливістю була S-образна форма середньої лінії. Здобуття таких залежностей виконувалося за результатами випробувань декількох багатоступінчастих компресорів, а також розрахунків тривимірної в'язкої течії в їх проточній частині за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. Розглянуто основні результати визначення характеристик компресорних грат різної геометрії з "керованою" дифузорністю, приведено коефіцієнти детермінації отриманих залежностей.

**Ключові слова:** компресор, керована дифузорність, середня лінія, кут відставання, коефіцієнт втрат.

### **GASDYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPRESSOR VANES WITH CONTROLLED DIFFUSION AIRFOILS**

*M. Y. Shelkovsky*

New dependences for determination of deviation angle and loss coefficient in the subsonic compressor vanes with controlled diffusion airfoils are offered in this work. S-shape middle line was their characteristic feature. The receipt of such dependences was executed on results of the tests of a few multi-stage compressors, and also calculations of three-dimensional viscid flow in their flow-path by a program complex ANSYS CFX. The basic results of characteristics determination of different geometry compressor vanes with controlled diffusion airfoils are considered, the coefficients of determination of the got dependences are resulted.

**Key words:** compressor, controlled diffusion, middle line, deviation angle, loss coefficient.

**Шелковський Михайл Юрьевич** - інженер 1 категорії сектора газодинаміки отдела компресорів ЦНІОКР «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев, Україна, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.