

В роботі представлені результати дослідження впливу співвідношення хорд лопаток першого і другого рядів дворядних решіток аеродинамічних профілів на значення параметра якості решіток при додатніх і від'ємних кутах атаки. Найбільш істотно ефект дворядності виявляється при кутах атаки $5^\circ \dots 10^\circ$ в решітках з розташуванням щілини на відстані 30...40 % сумарної хорди від носка профілю

Ключові слова: моделювання, кут атаки, дворядна решітка, зрив, компресор, течія, аеродинамічні характеристики, в'язкість

В работе представлены результаты исследования влияния соотношения хорд лопаток первого и второго рядов двухрядной решетки аэродинамических профилей на значения параметра качества решетки при положительных и отрицательных углах атаки. Наиболее существенно эффект двухрядности проявляется при углах атаки $5^\circ \dots 10^\circ$ в решетках с расположением щели на расстоянии 30...40 % суммарной хорды от носка профиля

Ключевые слова: моделирование, угол атаки, двухрядная решетка, срыв, компрессор, течение, аэродинамические характеристики, вязкость

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ХОРД ПРОФИЛЕЙ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХРЯДНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКИ

Ю. М. Терещенко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: Terj@nau.edu.ua

Е. В. Дорошенко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: Kiki_ua@ukr.net

Дж. Аболхассан заде

Аспирант*

E-mail: jalal.abolhasani@gmail.com

*Кафедра авиационных двигателей

Национальный авиационный университет
пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

1. Введение

Методы активного и пассивного управления обтеканием лопаточных венцов позволяют решать задачи повышения эффективности и расширения диапазона устойчивых режимов работы компрессоров газотурбинных двигателей [1–3].

Повышение эффективности компрессоров газотурбинных двигателей обеспечивается широким применением двухрядных лопаточных венцов в спрямляющих аппаратах последних ступеней многоступенчатых осевых компрессоров. Их установка обеспечивает большие углы поворота потока при бесрывном обтекании лопаточных венцов и, как следствие, низкий уровень потерь на расчетном режиме работы компрессора.

Применение методов вычислительного эксперимента позволяет детально исследовать процессы в осевых компрессорах, анализировать критические режимы течения в лопаточных венцах осевых компрессоров и разрабатывать рекомендации по совершенствованию газодинамических процессов в проточной части с целью обеспечения газодинамической устойчивости компрессоров.

Исследование влияния соотношения хорд лопаток первого и второго рядов в двухрядных лопаточных венцах в широком диапазоне углов атаки является актуальным и представляет практический интерес для

решения задач обеспечения газодинамической устойчивости компрессоров газотурбинных двигателей.

2. Анализ литературных данных и постановка задачи исследования

Исследованиям двухрядных лопаточных венцов посвящено много теоретических и экспериментальных работ. В работах [1, 2] изложены вопросы теории расчета двухрядных лопаточных венцов, теоретического расчета интегральных характеристик пограничного слоя. Результаты экспериментальных исследований двухрядных решеток и их характеристики приведены в работе [4]. В работе [5] представлены результаты исследования двухрядных лопаточных венцов с использованием численного эксперимента. В работе [6] проведено сравнение характеристик двухрядного лопаточного венца и лопаточного венца с активным управлением пограничным слоем. Вопросы колебаний и явления гистерезиса в двухрядных лопаточных венцах рассмотрены в работе [7]. Влияние густоты на характеристику двухрядных лопаточных венцов представлено в работе [8]. Результаты численного исследования сверхзвуковой ступени осевого вентилятора газотурбинного двигателя с двухрядным лопаточным венцом направляющего аппарата изложены в работе [9].

Особую роль при решении задачи обеспечения газодинамической устойчивости компрессоров играет учет особенностей аэродинамических характеристик лопаточных венцов при различном соотношении хорд лопаток первого и второго рядов. До настоящего времени не решены задачи о влиянии соотношения параметров лопаток первого и второго рядов на аэродинамические характеристики двухрядных компрессорных решеток в широком диапазоне углов атаки.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование влияния соотношения хорд лопаток первого и второго рядов двухрядной решетки аэродинамических профилей на значения параметра качества двухрядных решеток при положительных и отрицательных углах атаки.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- провести численное исследование аэродинамических характеристик двухрядных компрессорных решеток при различном соотношении хорд лопаток первого и второго ряда;

- проанализировать аэродинамические характеристики двухрядных компрессорных решеток с различным соотношением хорд лопаток первого и второго ряда при положительных углах атаки и сравнить с характеристиками эквивалентной однорядной решетки;

- проанализировать аэродинамические характеристики двухрядных компрессорных решеток с различным соотношением хорд лопаток первого и второго ряда при отрицательных углах атаки и сравнить с характеристиками эквивалентной однорядной решетки.

4. Исследование аэродинамических характеристик двухрядных компрессорных решеток при различном соотношении хорд лопаток первого и второго ряда

В практике современного компрессостроения двигателестроения широко используются аэродинамические характеристики решеток в виде зависимостей угла поворота потока $\Delta\beta$ и коэффициента потерь полного давления ξ (или аэродинамических коэффициентов профиля в решетке c_y и c_x) от угла атаки [1]. С помощью характеристики решетки можно оценить эффективность решетки в широком диапазоне режимов работы при положительных и отрицательных углах атаки.

При максимальном режиме работы угол атаки возрастает до критического $i_{кр}$. На спинке лопатки имеет место срыв потока, это проявляется в замедлении роста и в последующем падении угла отклонения потока $\Delta\beta$, а также в резком увеличении коэффициента потерь ξ .

При некотором угле атаки i_{min} коэффициент потерь имеет минимальное значение. При увеличении угла атаки от $i > i_{min}$ до $i = i_{opt}$ потери полного давления в решетке увеличиваются незначительно, а угол поворота потока $\Delta\beta$ возрастает существенно, поэтому качество профилей в решетке возрастает. Значение $i = i_{opt}$ соответствует максимуму коэффициента полезного действия ступени.

Максимальные значения степени повышения давления ступени компрессора имеют место при

максимальном угле поворота потока $\Delta\beta$ (при углах атаки $i \approx i_{кр}$). Эти режимы сопровождаются развитым вихревым течением, срывом потока и резким увеличением потерь полного давления. Расчетный угол атаки выбирают исходя из обеспечения необходимого запаса по отношению к критическому углу атаки $i_{кр}$. Обычно этому условию соответствует угол атаки близкий к нулю, при этом угол поворота потока в решетке в решетке равен $\Delta\beta = 0,8\Delta\beta_{max}$. Угол атаки i^* , при котором угол поворота потока в решетке равен $0,8\Delta\beta_{max}$, соответствует номинальному режиму работы.

Существуют оптимальные режимы работы решетки профилей. Имеет место целый ряд принципов оптимизации параметров компрессорных решеток: по максимальному качеству профилей в решетке, по максимальному коэффициенту полезного действия решетки, по минимуму потерь и некоторые другие. Оптимизация параметров компрессорной решетки из условия получения максимального качества профилей имеет наиболее строгие аэродинамические основы. Качество профиля в решетке определяется как отношение коэффициента подъемной силы профиля c_y к коэффициенту профильного сопротивления c_x :

$$k = \frac{c_y}{c_x} \tag{1}$$

Близким по физическому смыслу к качеству профилей в решетке может рассматриваться параметр качества решетки профилей как отношение относительного угла отклонения потока решеткой к относительному уровню потерь полного давления в решетке [1]:

$$k' = \frac{\Delta\bar{\beta}}{\bar{\xi}}, \tag{2}$$

где $\Delta\bar{\beta} = \frac{\Delta\beta}{\Delta\beta^*}$ и $\bar{\xi} = \frac{\xi}{\xi^*}$ – отношение текущих значений угла отклонения потока и коэффициента потерь полного давления ($\Delta\beta$ и ξ) к значениям этих параметров на номинальном режиме ($\Delta\beta^*$ и ξ^*).

В работе представлены результаты исследования пяти двухрядных решеток. Двухрядные решетки имеют одинаковые параметры: суммарная хорда $b_{\Sigma} = 52$ мм, шаг решетки $t = 40$ мм, угол установки профилей $\gamma = 63^\circ$, конструкционный угол входа потока первого ряда лопаток $\beta_{11к} = 26^\circ 40'$, конструкционный угол входа потока второго ряда лопаток $\beta_{12к} = 32^\circ 40'$, конструкционный угол выхода потока второго ряда лопаток $\beta_{22к} = 90^\circ$.

На рис. 1 представлена схема двухрядной решетки аэродинамических профилей при глубине щелевого канала $l_s = 0$.

Для двухрядных решеток использовался 6 % профиль серии ВС-10. Его координаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Координаты профиля ВС-10

\bar{x}	0	0,005	0,01	0,02	0,06	0,1	0,15	0,2	0,25
\bar{y}	0	0,0054	0,0078	0,0108	0,0173	0,0214	0,0246	0,0268	0,0282
\bar{x}	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
\bar{y}	0,0293	0,0298	0,03	0,029	0,0258	0,0207	0,0149	0,0088	0,0025

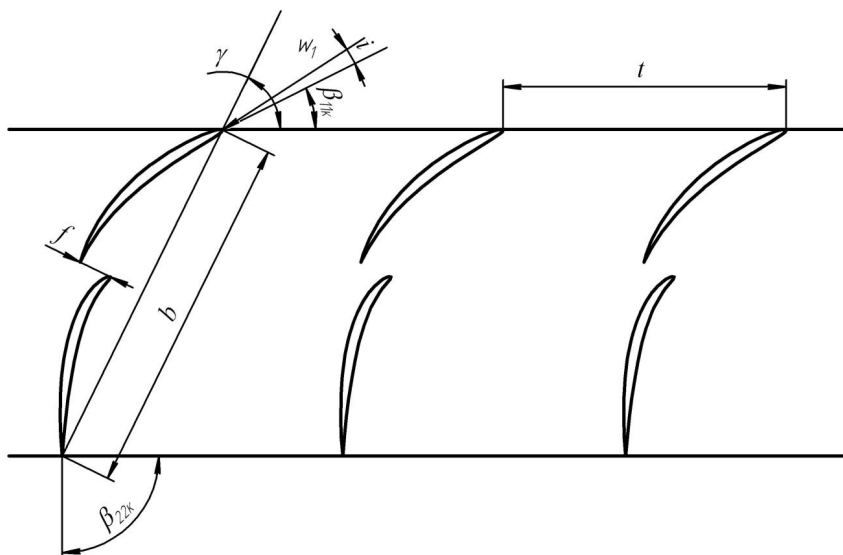


Рис. 1. Схема и основные параметры двухрядной решетки профилей

На рис. 2, а–д показаны схемы исследованных решеток из двухрядных профилей. Вариант № 1 двухрядного профиля – щелевой канал расположен на расстоянии 30 % суммарной хорды b_{Σ} от носика профиля первого ряда, вариант № 2 двухрядного профиля – щелевой канал расположен на расстоянии 40 % суммарной хорды b_{Σ} от носика профиля первого ряда, вариант № 3 двухрядного профиля – щелевой канал расположен на расстоянии 50 % суммарной хорды b_{Σ} от носика профиля первого ряда, вариант № 4 двухрядного профиля – щелевой канал расположен на расстоянии 60 % суммарной хорды b_{Σ} от носика профиля первого ряда, вариант № 5 двухрядного профиля – щелевой канал расположен на расстоянии 70 % суммарной хорды b_{Σ} от носика профиля первого ряда.

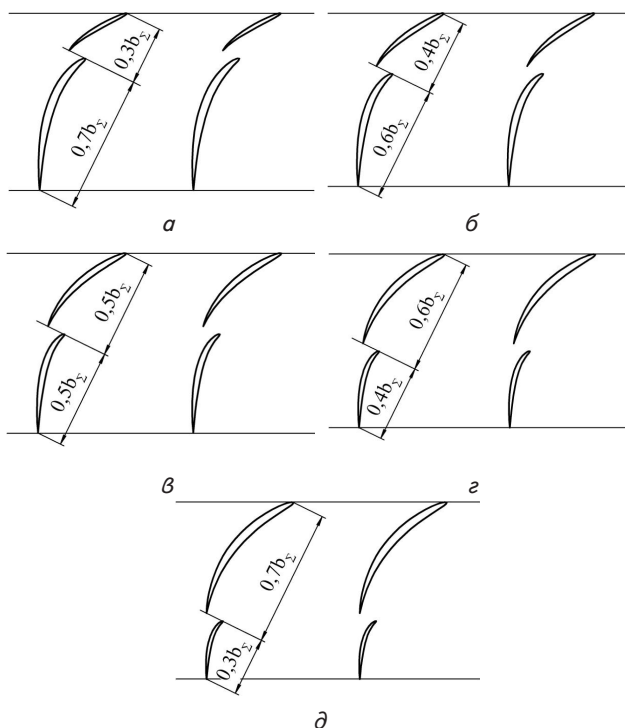


Рис. 2. Схемы компрессорных решеток из двухрядных профилей: а – вариант № 1; б – вариант № 2; в – вариант № 3; г – вариант № 4; д – вариант № 5

Исследуемые двухрядные решетки не имеют перекрытия по фронту решетки, то есть глубина щелевого канала равна нулю $l_s=0$.

В работе [1] даны рекомендации по выбору параметров щелевого канала (f – расстояние между поверхностями профилей первого и второго ряда, l_s – глубина щелевого канала) в зависимости от плотности решетки b/t при глубине щелевого канала $l_s=0$. Коэффициент двухрядности, характеризующий щелевой канал, записывается в виде:

$$K = \frac{\bar{f}}{t - \bar{f}}, \quad (3)$$

где $\bar{f} = \frac{f}{b_{\Sigma}}$, $\bar{t} = \frac{t}{b_{\Sigma}}$.

Для всех исследуемых двухрядных решеток, с учетом рекомендаций [1], высота щелевого канала $f=3,5$ мм.

На аэродинамические характеристики профилей в компрессорных решетках сильное влияние оказывает вязкость воздуха. Без учета вязкости невозможно иметь представление о возникающих при течении потерях и, следовательно, оценить коэффициент полезного действия. Кроме того, возникновение отрыва вязкого потока с поверхности профиля приводит к изменению характеристик компрессорной решетки профилей. Для расчета таких течений необходимо решать нестационарные уравнения Навье-Стокса. Решение этих уравнений невозможно без использования численных методов, в которых расчетная область течения аппроксимируется конечным числом расчетных точек. Основная трудность такого расчета турбулентных течений связана с тем, что в турбулентности важное значение имеют движения, масштабы которых намного меньше расстояний между узловыми точками в самых мелких расчетных сетках, используемых на практике. Перечисленные и другие трудности приводят к тому, что прямые расчеты турбулентных течений с использованием уравнений Навье-Стокса практически невозможны. Другой путь расчета турбулентных течений заключается в использовании осредненных уравнений Навье-Стокса, замыкающихся моделью турбулентной вязкости. Все существующие модели турбулентной вязкости имеют недостатки, однако для решения задач обтекания лопаточных машин лучше всего себя зарекомендовала модель SST Ментера [10], она объединяет в себе лучшие стороны моделей $k-\epsilon$ и $k-\omega$ [3]. Результаты расчета тестовой задачи для двухрядной решетки профилей приведены в работе [11].

Одна из задач, решение которой позволяет определить оптимальные параметры двухрядной решетки, заключается в обосновании выбора соотношения хорд лопаток первого и второго рядов.

В данной работе для решения этой задачи использовался метод вычислительного эксперимента и рассчитывались характеристики нескольких двухрядных компрессорных решеток с различным соотношением хорд лопаток первого и второго рядов.

Для расчетной области исследуемых двухрядных решеток использовалась мелкая адаптивная неструк-

турированная сетка и расчетная схема второго порядка с локальным использованием расчетной схемы первого порядка (High resolution).

Расчет течения в пяти двухрядных решетках проводился при фиксированном числе Маха на входе $M_{w1}=0,72$, угол атаки варьировался от -15° до $+15^\circ$.

На рис. 3, *a-e* показано мгновенное векторное поле распределения скорости при угле атаки $i=+2^\circ$ и числе Маха $M_{w1}=0,72$ для пяти вариантов двухрядных решеток и однорядной геометрически эквивалентной решетки (вариант № 6).

При угле атаки $i>+5^\circ$ возникает отрыв пограничного слоя с поверхностей лопатки в однорядной решетке, что связано с возрастанием градиента давления по мере удаления от носика профиля. Течение в межлопаточных каналах двухрядных решеток всех пяти вариантов, как видно из рис. 3, происходит без отрыва.

По данным численного эксперимента исследуемых двухрядных решеток были построены зависимости параметра качества решеток $k' = \frac{\Delta\bar{\beta}}{\xi}$ от угла атаки i (рис. 4).

Как следует из рассмотрения графика на рис. 4, значения параметра качества двухрядных решеток k' всех исследованных двухрядных решеток при положительных углах атаки выше, чем у геометрически эквивалентной однорядной решетки. Наиболее су-

щественно эффект двухрядности проявляется при углах атаки $i=5^\circ...10^\circ$ в решетках с расположением щели $x_{щ} = (0,3...0,4)b_z$ от носка профиля.

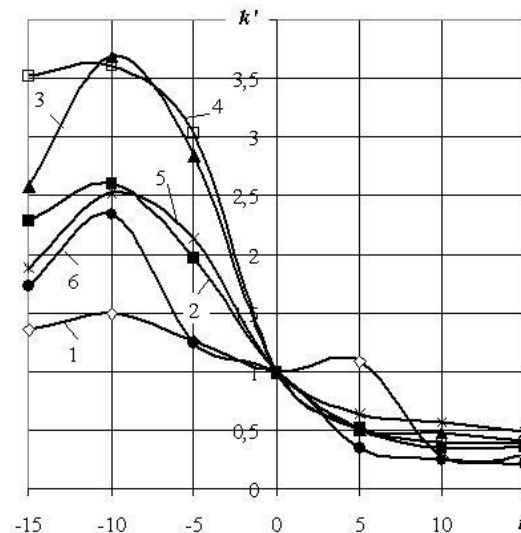


Рис. 4. Зависимости параметра качества двухрядных решеток k' от угла атаки i : 1–5 – варианты двухрядных решеток; 6 – однорядная геометрически эквивалентная решетка

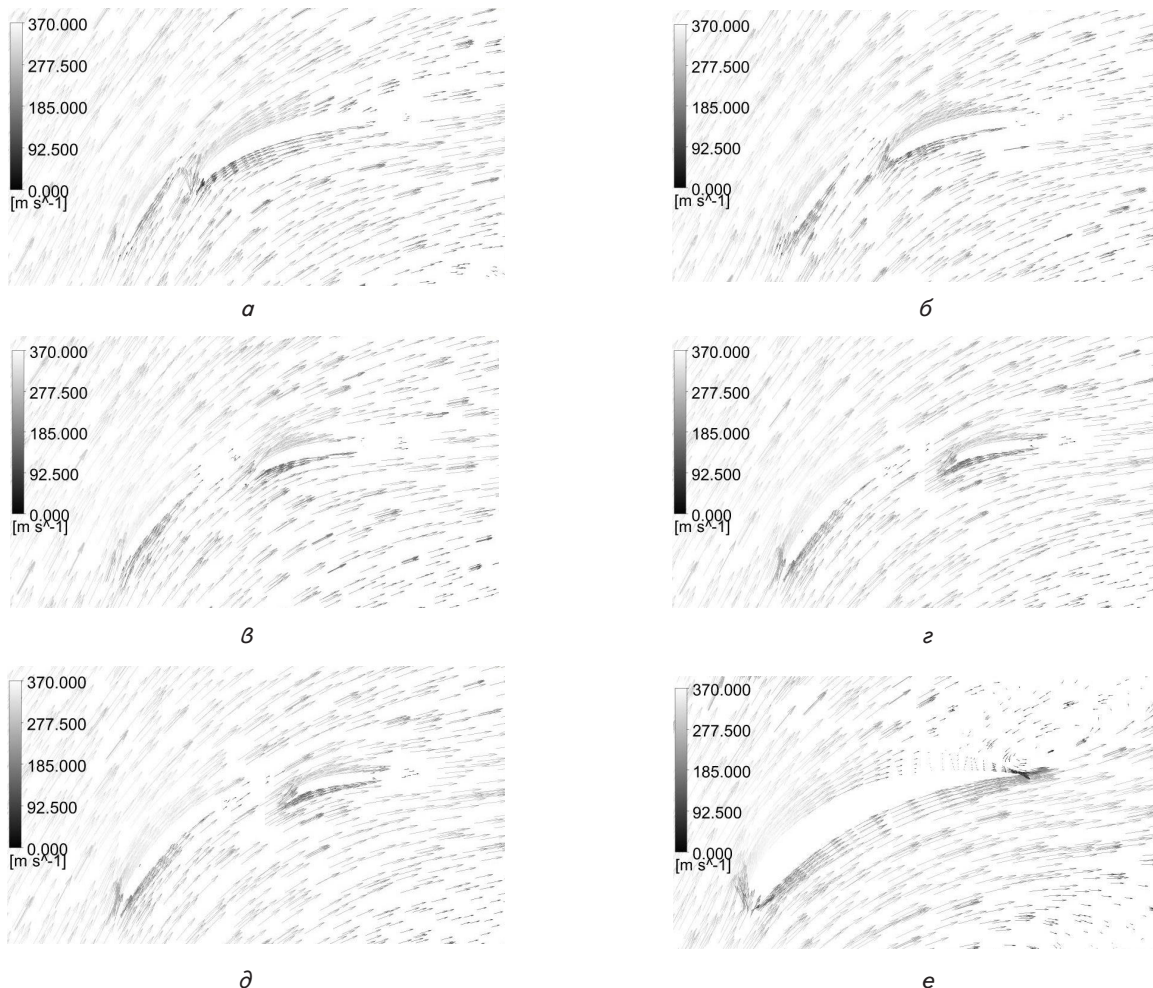


Рис. 3. Мгновенное векторное поле распределения скорости при угле атаки $i=+2^\circ$ и числе Маха $M_{w1}=0,72$: а – вариант № 1; б – вариант № 2; в – вариант № 3; г – вариант № 4; д – вариант № 5; е – вариант № 6

5. Выводы

1. Результаты исследования показали, что аэродинамические характеристики двухрядных компрессорных решеток существенно зависят от соотношения хорд лопаток первого и второго ряда.

2. При положительных углах атаки параметр качества двухрядных решеток выше, чем однорядных, при $x_{\text{ш}} = (0,3...0,4)b_{\Sigma}$.

3. При отрицательных углах атаки параметр качества двухрядных решеток выше, чем однорядных, при $x_{\text{ш}} = (0,5...0,7)b_{\Sigma}$.

Литература

1. Терещенко, Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров [Текст] / Ю. М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
2. Гостелу, Дж. Аэродинамика решеток турбомашин [Текст] / Дж. Гостелу. – М.: Мир, 1987. – 392 с.
3. Chen, N. Aerothermodynamics of turbomachinery: analysis and design [Text] / N. Chen. – Singapore: John Wiley & Sons Pte Ltd, 2010. – 461 p. doi: 10.1002/9780470825020
4. Фиккерт, К. Исследование диффузорных решеток с большим отклонением потока [Текст] / К. Фиккерт // Вопросы ракетной техники. – 1953. – № 1. – С. 57–67.
5. McGlumphy, J. 3D Numerical Investigation of Tandem Airfoils for a Core Compressor Rotor [Text] / J. McGlumphy, Ng Wing-Fai, R. Steven, W. Kempf, S. Kempf // Journal of Turbomachinery. – 2010. – Vol. 132, Issue 3. – P. 1–9. doi: 10.1115/1.3149283
6. Zhao, S. Exploring the intention of using aspirated cascade to replace tandem cascades [Text] / S. Zhao, J. Luo, X. Lu, J. Zhu // Journal of Thermal Science. – 2010. – Vol. 19, Issue 5. – P. 390–396. doi: 10.1007/s11630-010-0399-4
7. Lee, T. Flow past two in-tandem airfoils undergoing sinusoidal oscillations [Text] / T. Lee // Experiments in Fluids. – 2011. – Vol. 51, Issue 6. – P. 1605–1621. doi: 10.1007/s00348-011-1173-4
8. Shen, C. Numerical and experimental investigation of an axial compressor flow with tandem cascade [Text] / C. Shen, X. Qiang, J. Teng // Journal of Thermal Science. – 2012. – Vol. 21, Issue 6. – P. 500–508. doi: 10.1007/s11630-012-0574-x
9. Qiushi, L. Application of tandem cascade to design of fan stator with supersonic inflow [Text] / L. Qiushi, W. Hong, Zh. Sheng // Chinese Journal of Aeronautics. – 2010. – Vol. 23, Issue 1. – P. 9–14. doi: 10.1016/s1000-9361(09)60181-3
10. Menter, F. R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F. R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, Issue 8. – P. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149
11. Терещенко, Ю. М. Моделирование течения в двухрядных лопаточных венцах [Текст] / Ю. М. Терещенко, Е. В. Дорошенко, Дж. Аболхассан заде // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 22. – С. 75–77.