УДК 533.697:621.51

Ю. А. КВАША, Н. А. ЗИНЕВИЧ

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ЛОПАТКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА СВЕРХЗВУКОВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ

Работа посвящена аэродинамической оптимизации высоконагруженного рабочего колеса сверхзвуковой компрессорной ступени. В качестве основного инструмента используется численное моделирование течения в колесе на основе полных осредненных уравнений Навье–Стокса и двухпараметрической модели турбулентности. Особенностями используемого подхода к оптимизации являются: применение достаточно “грубых” расчетных сеток, сохраняющих, однако, чувствительность результатов расчета к изменению формы лопатки; формулировка критериев качества как осредненных по расходу воздуха величин энергетических характеристик рабочего колеса; применение достаточно простого способа варьирования пространственной формы лопатки колеса; поиск оптимальной пространственной формы лопатки с использованием точек равномерно распределенных последовательностей в пространстве переменных. В результате проведенного исследования выбраны два варианта пространственной формы лопатки колеса, обеспечивающие увеличение значений его энергетических характеристик по сравнению с прототипом (в первом случае получено только повышение адиабатического КПД, во втором – повышение КПД и степени сжатия колеса). Обоснованность данного выбора подтверждена последующим расчетом энергетических характеристик рабочего колеса с исходной и оптимизированными лопатками на подробной расчетной сетке. В целом продемонстрировано, что на основе предложенного рационального выбора сравнительно небольшого числа параметров, применяемых для варьирования пространственной формы лопатки колеса, может быть существенно повышена его степень сжатия при одновременном увеличении адиабатического КПД. Полученные в работе результаты могут быть использованы при аэродинамической оптимизации пространственной формы лопаток неподвижных и вращающихся лопаточных венцов компрессоров.

Роботу присвячено аеродинамічній оптимізації високонавантаженого робочого колеса надзвукового компресорного ступеня. Як основний інструмент використовується числове моделювання течії в колесі на основі повних осереднених рівнянь Нав’є–Стокса й двопараметричної моделі турбулентності. Особливостями використовуваного підходу до оптимізації є: застосування досить “грубих” розрахункових сіток, що зберігають, однак, чутливість результатів розрахунку до зміни форми лопатки; формулювання критеріїв якості як осереднених по витраті повітря величин енергетичних характеристик робочого колеса; застосування досить простого способу варіювання просторової форми лопатки колеса; пошук оптимальної просторової форми лопатки з використанням точок рівномірно розподілених послідовностей у просторі змінних. У результаті проведеного дослідження обрано два варіанти просторової форми лопатки колеса, що забезпечують збільшення значень його енергетичних характеристик у порівнянні із прототипом (у першому випадку отримано тільки підвищення адіабатичного ККД, у другому – підвищення ККД і ступеня стиску колеса). Обґрунтованість даного вибору підтверджено наступним розрахунком енергетичних характеристик робочого колеса з вихідною й оптимізованою лопатками на детальній розрахунковій сітці. У цілому продемонстровано, що на основі запропонованого раціонального вибору порівняно невеликого числа параметрів, застосовуваних для варіювання просторової форми лопатки колеса, може бути істотно підвищено його ступінь стиску при одночасному збільшенні адіабатичного ККД. Отримані в роботі результати можуть бути використані при аеродинамічній оптимізації просторової форми лопаток нерухомих і обертових лопаткових вінців компресорів.

The study is addressed to an aerodynamic optimization of a high-loaded impeller of a supersonic compressor stage. A numerical simulation of the flow through the impeller is the basic tool using the complete averaged Navier–Stocks equations and a two-parameter model of turbulence. The special features of the approach used are the application of sufficiently rough computational grids sensitive to variations in the blade form; the formulation of the qualitative criteria as values of the power characteristics of the impeller averaged on the air flow; the application of a sufficiently simple procedure of variations in a spatial form of the impeller blade; the search of an optimal spatial form of the blade using points of the equally distributed sequences in space of variables. From the study made two versions of a spatial form of the impeller blade have been chosen providing an increase in values of its power characteristics in comparison with the prototype (in the first case an adiabatic efficiency only increases, in the second case an adiabatic efficiency and the pressure ratio of the impeller increase). A given choice is validated by the subsequent computation of the power characteristics of the impeller with the reference and optimized blades using a comprehensive computational grid. It is demonstrated as a whole that based on the proposed rational choice of a moderate number of the parameters employed for varying a spatial form of the blade, its pressure ratio can be increased significantly in a simultaneous increase in an adiabatic efficiency. The research results can be used for an aerodynamic optimization of a spatial form of blades of fixed and rotating blade rims of compressors.

Ключевые слова: *аэродинамическая оптимизация, рабочее колесо компрессорной ступени, численное моделирование, пространственная форма лопатки, энер-*

гетические характеристики.

При аэродинамической оптимизации лопаточных венцов компрессоров и турбин, основанной на применении численного моделирования трехмерных турбулентных течений газа, имеют место следующие три затруднения [1].

1. Использование численного моделирования на основе полных трехмерных уравнений Навье–Стокса приводит к тому, что время вычисления одного режима течения становится очень большим и полное время оптимизации становится неприемлемым для практики.

2. Результаты оптимизации зависят от используемого алгоритма оптимизации. В большинстве случаев пространство параметров соответствует многоэкстремальной задаче, и для определения глобального оптимума необходимо применение алгоритмов зондирования всей области параметров.

3. Непростой задачей является описание пространственной формы лопаток с использованием небольшого числа параметров. Если задавать геометрические параметры, непосредственно описывающие сложную трехмерную форму лопатки, число этих параметров стремится к очень большой величине. При этом в процессе оптимизации могут рассматриваться много случаев, которые являются неприемлемыми. Эти факторы увеличивают время оптимизации, и основным требованием здесь является уменьшение числа проектных параметров.

Для преодоления указанных трудностей используются различные подходы, такие как построение “поверхностей отклика” [2, 3] на основе результатов небольших серий расчетов значений целевой функции; использование методов глобального зондирования области варьируемых параметров и методов градиентного поиска [1, 4 – 8]; применение сплайн-аппроксимаций различного вида [9 – 11] для описания формы профилей лопаток и другие. При этом исследования, направленные на дальнейшее развитие методов аэродинамической оптимизации компрессоров и турбин, продолжают оставаться актуальными.

В работе [12] предложена экономичная методика аэродинамической оптимизации компрессорных венцов на основе численного моделирования пространственных турбулентных газовых течений. Главными особенностями методики являются: применение достаточно “грубых” расчетных сеток, сохраняющих, тем не менее, чувствительность результатов расчета к изменению формы лопаток; поиск оптимальных геометрических параметров лопаток с использованием точек равномерно распределенных последовательностей в пространстве переменных.

Цель данной работы – аэродинамическая оптимизация высоконагруженного рабочего колеса компрессорной ступени на основе указанной экономичной методики, дополненной простым способом варьирования пространственной формы лопаток.

Для оптимизации было выбрано хорошо известное в имеющейся литературе рабочее колесо Rotor-37 сверхзвуковой компрессорной ступени [13].

Численное моделирование пространственного турбулентного потока в межлопаточных каналах рабочего колеса производилось на основе метода [14], разработанного в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины. В данном методе исходными уравнениями математической модели течения являются полные осредненные уравнения Навье–Стокса и уравнения ($k-\varepsilon$)-модели турбулентности. В качестве основных переменных приняты контравариантные составляющие скорости потока. Граничные условия на поверхностях лопаток и ограничивающих стенках проточной части лопаточного венца ставятся на основе метода пристеночных функций, что позволяет использовать расчетные сетки со сравнительно небольшим числом узлов. Работоспособность метода подтверждена, например, в [15].

При проведении аэродинамической оптимизации применялась расчетная сетка, содержащая 14×14 ×34 узлов (по высоте, ширине и длине межлопаточного канала) в соответствии с [12, 16].

Как и в работе [12], в роли критериев качества рассматривались величины энергетических характеристик колеса: адиабатический КПД $\overline{\eta}^*_{р.к.}$ и степень сжатия $\overline{\pi}^*_{р.к.}$, осредненные по расходу воздуха через колесо. Эти величины определялись в каждом случае по результатам серии расчетов течения в колесе на различных режимах работы по расходу воздуха и при фиксированной форме лопаток.

В настоящей работе использована следующая методика описания и варьирования пространственной формы компрессорной лопатки.

Предполагается, что форма лопатки задана совокупностью профилей в сечениях лопатки, расположенных на различных радиусах проточной части компрессорного венца.

Каждый профиль описывается следующим набором чисел и функций:

– величиной угла установки β;

– функцией $y(x)$ ($0 \le x \le 1$, $y(0)=y(1)=0$), задающей в безразмерном виде среднюю линию профиля, при этом характерным масштабом является длина хорды профиля l;

– функцией $\delta(x)$ ($0 \le x \le 1$), задающей в безразмерном виде толщину профиля (характерный масштаб – l);

– длиной хорды профиля l.

Варьирование геометрической формы профиля производится с использованием четырех параметров (далее звездочкой отмечены новые значения величин и функций, получающиеся в результате варьирования)

$$\beta^* = \beta + \tilde{\beta}, \tag{1}$$

$$y^*(x) = y(x)(1+\xi),\ 0 \le x \le 1, \tag{2}$$

$$\begin{cases} y^* = y(x) \\ x^* = \alpha(x-1)x + x \end{cases},\ 0 \le x \le 1, \tag{3}$$

$$l^* = l(1+\gamma), \tag{4}$$

$$\delta^*(x) = \delta(x)\left(\frac{1}{1+\gamma}\right)^2,\ 0 \le x \le 1, \tag{5}$$

где $\tilde{\beta}$ – параметр, задающий изменение угла установки профиля; ξ – параметр, определяющий растяжение графика функции $y(x)$ вдоль оси y; α – параметр, используемый для “деформации” графика функции $y(x)$ вдоль оси x (при этом можно изменять положение точки максимального прогиба профиля); γ – параметр, определяющий изменение длины хорды профиля.

Формулы (3) описывают зависимость $y^*(x^*)$, заданную параметрически. Использование выражения (5) позволяет в первом приближении учесть требования, предъявляемые к прочности лопатки, путем сохранения площади профиля неизменной при варьировании его длины.

Соотношения (1) – (5) применяются для каждого профиля из имеющейся совокупности профилей в сечениях лопатки.

При проведении оптимизации в данном исследовании величины $\tilde{\beta}$, ξ, α и γ задавались в трех сечениях лопатки, соответствующих радиусу втулки, среднему радиусу и радиусу периферии проточной части венца. Таким образом, при оптимизации использовалось двенадцать независимых переменных. Значения указанных параметров вычислялись по формулам

$$\tilde{\beta}_h = 2\tilde{\beta}_{\max}(x_1 - 0{,}5), \quad \tilde{\beta}_m = 2\tilde{\beta}_{\max}(x_2 - 0{,}5), \quad \tilde{\beta}_t = 2\tilde{\beta}_{\max}(x_3 - 0{,}5),$$

$$\xi_h = 2\xi_{\max}(x_4 - 0{,}5), \quad \xi_m = 2\xi_{\max}(x_5 - 0{,}5), \quad \xi_t = 2\xi_{\max}(x_6 - 0{,}5),$$

$$\alpha_h = 2\alpha_{\max}(x_7 - 0{,}5), \quad \alpha_m = 2\alpha_{\max}(x_8 - 0{,}5), \quad \alpha_t = 2\alpha_{\max}(x_9 - 0{,}5),$$

$$\gamma_h = 2\gamma_{\max}(x_{10} - 0{,}5), \quad \gamma_m = 2\gamma_{\max}(x_{11} - 0{,}5), \quad \gamma_t = 2\gamma_{\max}(x_{12} - 0{,}5),$$

где индексами h, m и t отмечены величины соответственно во втулочном, среднем и периферийном сечениях лопатки; индексом $\max$ обозначены максимальные по модулю значения параметров; $(x_1, x_2, ..., x_{12})$ – координаты точки равномерно распределенной последовательности в единичном кубе, которые рассчитывались в соответствии с методом, описанным в [17]. Максимальные значения параметров были приняты следующими: $\tilde{\beta}_{\max} = 4°$; $\xi_{\max} = 0{,}3$; $\alpha_{\max} = 0{,}4$; $\gamma_{\max} = 0{,}25$. В промежуточных сечениях лопатки величины $\tilde{\beta}$, ξ, α и γ определялись с использованием зависимостей, обеспечивающих гладкую монотонную интерполяцию значений этих параметров на интервалах от втулочного до среднего сечения и от среднего до периферийного сечения лопатки.

В таблице приведены полученные в результате численного моделирования величины критериев качества $\overline{\eta}^*_{р.к.}$ и $\overline{\pi}^*_{р.к.}$, а также значения максимального расхода воздуха $G_{\max}$ для рабочего колеса, формы лопаток которого соответствуют 32 точкам равномерно распределенной последовательности в единичном кубе. Точка номер 1 имеет координаты $x_i = 0{,}5$; $i = \overline{1{,}12}$. Эта точка определяет исходную пространственную форму лопатки колеса. Рассмотрение приведенных в таблице данных показывает, что имеются, по крайней мере, две точки последовательности в пространстве переменных, представляющие интерес для аэродинамической оптимизации формы лопатки.

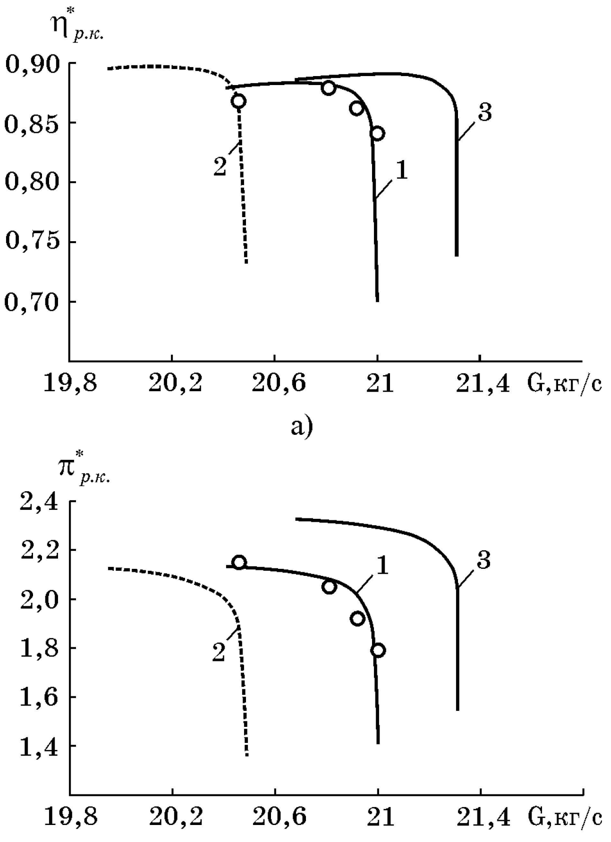
Точке номер 15 соответствует формально самое большое значение $\overline{\eta}^*_{р.к.}$, превышающее исходное значение $\overline{\eta}^*_{р.к.}$ в точке номер 1 на 2,1 %. Точке номер 28 соответствует практически такое же высокое значение $\overline{\eta}^*_{р.к.}$, как и точке номер 15, но в точке номер 28 достигается самое высокое значение $\overline{\pi}^*_{р.к.}$, превышающее исходное значение в точке номер 1 на 7,6 % .

Таблица

Номер точки	$\overline{\eta}^*_{р.к.}$	$\overline{\pi}^*_{р.к.}$	$G_{\max}$, кг/с
1	0,824	1,950	21,04
2	0,828	1,964	21,50
3	0,800	1,855	20,56
4	0,832	2,026	21,65
5	0,797	1,787	19,30
6	0,812	1,933	20,59
7	0,797	1,836	22,28
8	0,798	1,860	21,41
9	0,812	1,941	20,58
10	0,811	1,843	21,06
11	0,815	1,974	20,95
12	0,832	1,975	20,15
13	0,796	1,798	21,78
14	0,804	1,924	20,63
15	0,841	1,896	20,48
16	0,822	1,909	21,16
17	0,837	2,025	19,94
18	0,837	1,945	20,40
19	0,789	1,843	21,36
20	0,827	1,979	20,06
21	0,797	1,816	21,10
22	0,800	1,910	21,01
23	0,801	1,743	21,18
24	0,829	1,925	20,95
25	0,826	2,046	22,51
26	0,809	1,823	22,00
27	0,770	1,697	19,56
28	0,840	2,107	21,50
29	0,779	1,735	20,75
30	0,787	1,794	19,18
31	0,820	1,867	21,6
32	0,831	2,072	21,27

Точка номер 15 имеет координаты (0,938; 0,063; 0,563; 0,938; 0,313; 0,438; 0,813; 0,688; 0,438; 0,813; 0,938; 0,063), точка номер 28 – (0,219; 0,844; 0,219; 0,531; 0,906; 0,469; 0,906; 0,719; 0,156; 0,781; 0,781; 0,219).

В окрестности точки номер 15 было проведено дополнительное исследование градиентным методом, в качестве функции цели рассматривалась величина $1-\overline{\eta}^*_{р.к.}$. В результате на расстоянии 0,6 от точки номер 15 была определена точка, где $\overline{\eta}^*_{р.к.}$ = 0,854. Однако дальнейшие расчеты энергетических характеристик исследуемого рабочего колеса в последней точке, выполненные с использованием подробной расчетной сетки (содержащей 30×40×80 узлов), показали, что в периферийной области лопаток колеса формируется отрыв потока, не определяемый на “грубой” сетке и существенно уменьшающий диапазон режимов работы колеса по расходу воздуха. Данный результат свидетельствует о необходимости уточнения результатов аэродинамической оптимизации с использованием подробных расчетных сеток.



а)

б)

Рис. 1

В соответствии с указанным обстоятельством проведено численное моделирование течения в исследуемом колесе на сетке, содержащей 30×40×80 узлов. Результаты расчетов показаны на рис. 1 в виде энергетических характеристик рабочего колеса при исходной (позиция 1) и оптимизированных пространственных формах лопатки; последние соответствуют точкам номер 15 (позиция 2) и номер 28 (позиция 3) в таблице. Там же кружками обозначены экспериментальные данные для исходной формы лопатки [13].

Рассмотрение приведенных результатов расчетов показывает, что вариант пространственной формы лопатки, при котором реализуется зависимость 2, обеспечивает увеличение максимального значения КПД колеса на 1,6 % по сравнению с его величиной при исходной форме лопатки. При этом степень сжатия колеса при расходе воздуха, соответствующем максимуму КПД, уменьшается на 1,3 % по сравнению с аналогичной величиной на зависимости 1.

Вариант формы лопатки, при котором реализуется зависимость 3, позволяет, как показывают расчеты, увеличить максимальное значения КПД колеса на 0,9 % по сравнению с его величиной при исходной форме лопатки. В этом случае существенно (на 8,1 % по сравнению с аналогичной величиной на зависимости 1) повышается степень сжатия колеса при расходе воздуха, соответствующем максимуму КПД.

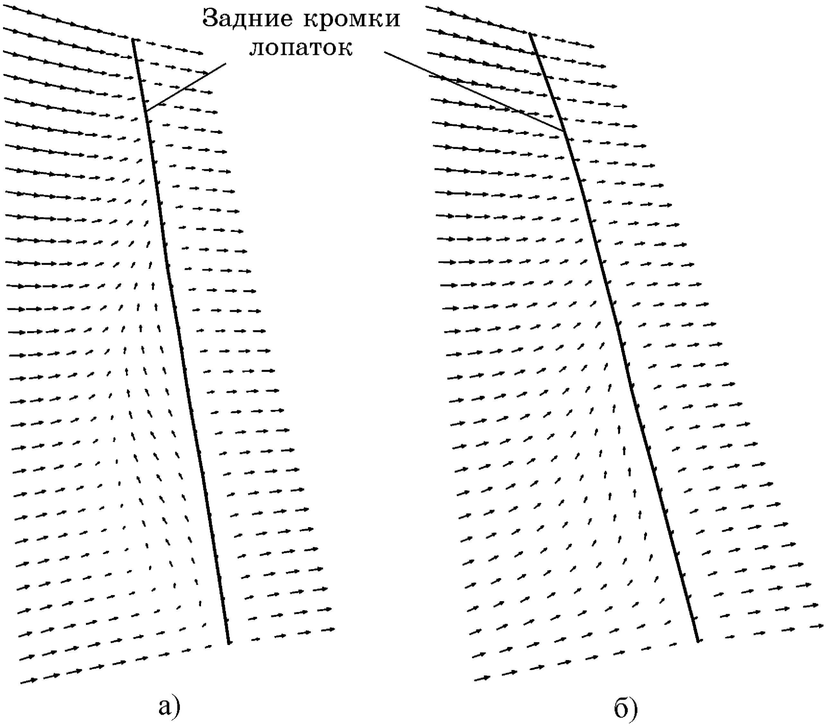


Рис. 2

Отмеченное выше увеличение максимального значения адиабатического КПД рабочего колеса на 1,6 % по сравнению с его величиной при исходной форме лопатки приводит к заметному уменьшению зоны отрыва потока, характерной для исследуемого рабочего колеса даже при максимальном значении КПД. Это иллюстрирует рис. 2, где показаны меридиональные проекции векторов скорости потока вблизи стороны разрежения лопатки на выходе из колеса. Рис. 1, а) описывает течение при исходной форме лопатки, рис. 1, б) – при модифицированной лопатке, соответствующей точке 15 в таблице.

Выводы. Выполнена аэродинамическая оптимизация высоконагруженного рабочего колеса сверхзвуковой компрессорной ступени на основе численного моделирования пространственных турбулентных газовых течений. Расчетным путем показано, что на основе рационального выбора сравнительно небольшого числа параметров, применяемых для варьирования пространственной формы лопатки колеса, может быть существенно повышена его степень сжатия при одновременном увеличении адиабатического КПД.

Полученные результаты предполагается использовать в дальнейшем при аэродинамической оптимизации геометрических параметров неподвижных и вращающихся лопаточных венцов компрессоров.

1. *Ashihara K.* Turbomachinery blade design using 3-D inverse design method, CFD and optimization algorithm / *K. Ashihara, A. Goto* // Proc. of ASME TURBO EXPO 2001. – New Orleans, Louisiana (USA), 2001. – 9 p.
2. *Chan-Sol Ahn.* Aerodynamic design optimization of an axial flow compressor rotor / *Chan-Sol Ahn, Kwang-Yong Kim* // Proc. of ASME TURBO EXPO 2002. – Amsterdam (The Netherlands), 2002. – 7 p.
3. *Sivashanmugam V. K.* Aero-structural optimization of an axial turbine stage in three-dimensional flow / *V. K. Sivashanmugam, M. Arabnia, W. Ghaly* // Proc. of ASME TURBO EXPO 2010. – Glasgow (UK), 2010. – 14 p.
4. *Ершов С. В.* Аэродинамическая оптимизация пространственной формы лопаток паровых и газовых турбин / *С. В. Ершов, В. А. Яковлев* // Авиационная космическая техника и технология. – 2008. – № 7. – С. 66 – 70.
5. *Меняйлов А. В.* Применение эволюционных методов для решения задач оптимизации компрессоров газотурбинных двигателей / *А. В. Меняйлов, А. А. Трончук, Е. М. Угрюмова* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 5. – С. 59 – 65.
6. *Jinguang Yang.* Multi-row inverse method based on the adjoint optimization / *Jinguang Yang, Xiuquan Huang, Hu Wu* // Proc. of ASME TURBO EXPO 2011. – Vancouver, British Columbia (Canada), 2011. – 11 p.
7. *Xiang X.* Optimum initial design of centrifugal compressor stage with genetic algorithm / *X. Xiang, X. L. Zhao* // Proc. of XV Int. Symp. on Air Breathing Engines. – Bangalore (India), 2001. – 6 p.
8. *Oksuz O.* Turbine cascade optimization using an Euler coupled genetic algorithm / *O. Oksuz, I. S. Akmandor* // Proc. of XV Int. Symp. on Air Breathing Engines. – Bangalore (India), 2001. – 9 p.
9. *Rongye Zheng*. Blade geometry optimization for axial flow compressor / *Rongye Zheng, Jianhua Xiang, Jinju Sun* // Proc. of ASME TURBO EXPO 2010. – Glasgow (UK), 2010. – 12 p.
10. *Xu C.* A turbine airfoil aerodynamic design process / *C. Xu, R. S. Amano* // Proc. of ASME TURBO EXPO 2001. – New Orleans, Louisiana (USA), 2001. – 10 p.
11. *Мелашич С. В.* Способ параметрического описания профилей компрессорных решеток / *С. В. Мелашич* // Техническая механика. – 2012. – № 2. – С. 77 – 82.
12. *Кваша Ю. А.* К аэродинамической оптимизации рабочих колес сверхзвуковых компрессорных ступеней / *Ю. А. Кваша, Н. А. Зиневич* // Техническая механика. – 2016. – № 2. – С. 55 – 63.
13. Design and Overall Performance of Four Highly Loaded, High-Speed Inlet Stages for an Advanced High-Pressure-Ratio Core Compressor : NASA Technical Paper 1337. – 1978. – 132 p.
14. *Кваша Ю. А.* Расчет пространственного турбулентного потока в межлопаточных каналах сверхзвуковых компрессорных ступеней / *Ю. А. Кваша* // Техническая механика. – 1999. – №1. – С. 9 – 13.
15. Численное исследование двухступенчатого вентилятора / *Е. Ю. Рублевский, Д. А. Плакущий, В. И. Письменный, Ю. А. Кваша* // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 2. – С. 169 – 176.
16. *Кваша Ю. А.* К выбору расчетных сеток при численном моделировании пространственных турбулентных течений в рабочих колесах сверхзвуковых компрессорных ступеней / *Ю. А. Кваша, Н. А. Зиневич* // Техническая механика. – 2013. – № 3. – С. 34 – 41.
17. *Соболь И. М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / *И. М. Соболь, Р. Б. Статников.* – М. : Наука, 1981. – 110 с.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепр

Получено 19.09.2016,
в окончательном варианте 19.09.2016