

А. В. БОЙКО, А. П. УСАТЫЙ, В. С. БАРАННИК

ОПТИМИЗАЦИЯ ТУРБИНЫХ РЕШЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ОБВОДА ПРОФИЛЯ И КАНАЛА

АННОТАЦИЯ В работе предложена методика многокритериальной оптимизации турбинных решеток с использованием геометрических критериев качества турбинных профилей (описанных BiArc-кривыми) и образованных ими каналов. Рассмотрены особенности предлагаемой методики, а также приведено математическое описание предлагаемого комплекса геометрических критериев, описывающих качество как турбинных профилей, так и образованных с их помощью каналов. Описан метод оптимизации и алгоритмы свертки и нормирования комплекса геометрических критериев качества. Приведены примеры оптимальных турбинных решеток и профилей. Даны результаты сравнительных численных исследований эффективности оптимальных турбинных решеток, полученных с помощью предлагаемого метода оптимизации и турбинной решетки, построенной с использованием атласного профиля P2. Показана более высокая эффективность оптимальных турбинных решеток и объяснена физическая природа полученных результатов.

Ключевые слова: Оптимизация турбинной решетки, геометрические критерии качества, BiArc-кривая, сравнительный численный эксперимент.

A. BOIKO, A. USATY, V. BARANNIK

OPTIMIZATION OF THE TURBINE GRIDS USING GEOMETRIC QUALITY CRITERIA FOR CIRCUMSCRIPTION OF THE PROFILE AND CHANNEL

ABSTRACT The multi-criteria optimization method of the turbine grids using the geometric quality criteria of circumscription of the turbine profiles and channels, created by them, is developed. The article presents the features of the proposed methodology and the mathematical description of the proposed complex of geometric criteria that describes the quality of the turbine grids. The method of optimization as well as convolution algorithms and regulation of geometric quality criteria complex has been described. The article presents the results of the optimization of three turbine grids. The results of comparative research of efficiency of optimal turbine grids, obtained using the proposed method of optimization, and the turbine grids built using the initial profiles P2 are given. A higher efficiency of the optimal turbine grids has shown and the physical nature of the results was explained. Because of the complex criteria of quality and quantity parameters, that have influence on the efficiency of turbine profile cascades, objective function is multimodal. Due to the high efficiency of the original profiles, the values of optimal profiles in extreme locations differ slightly. Therefore, the search for the best solution (global extremum point) demanded the combination of several methods for finding optimal solutions.

Key words: Turbines profile, BiArc-curve, Turbine grid, Geometric quality criteria, Optimization, Comparative numerical experiment.

Введение

Эффективность проточной части осевой турбины во многом определяется эффективностью сопловых и рабочих решеток, которые в свою очередь зависят от качества формы обводов турбинных профилей и образованных с их помощью каналов решетки. Вопросам повышения эффективности турбинных профилей посвящено множество теоретических [1, 2], расчетных [3–9] и экспериментальных [10–13] научно-исследовательских работ. Все они внесли свой вклад в понимание физической сути аэродинамических процессов, проходящих при обтекании турбинных профилей и позволили создать современные высокоэффективные турбинные профили, как для сопловых, так и для рабочих решеток [14, 15]. Расчетные исследования, последних лет [16, 17], связанные с повышением эффективности турбинных профилей и решеток показали, во-первых, что данная задача является актуальной и сегодня, а во-вторых, высокую сложность и трудоемкость таких задач. Следует отметить, что в первую очередь высокий уро-

вень сложности получения положительного результата при решении таких задач обусловлен достаточно высоким уровнем эффективности современных турбинных профилей. Следует отметить, что первые расчетно-теоретические работы [1, 5] посвященные созданию высокоэффективных турбинных профилей были ориентированы на получение профилей с плавно меняющейся кривизной их обводов. Для этих целей были разработаны и использованы геометрические критерии качества – «минимум максимальной кривизны» и «минимум потенциальной энергии изгиба кривых» [1, 5]. Применение этих критериев при оптимизации формы турбинных профилей позволило впервые аналитически получить высокоэффективный турбинный профиль 1ММК с уровнем потерь меньше чем у атласного профиля P2.

Вместе с тем, учитывая тот факт, что течение рабочего тела происходит в каналах турбинной решетки, форма которых непосредственно влияет на эффективность течения, становится очевидной необходимость перехода от задачи оптимизации формы обвода турбинных профилей к

© А. В. Бойко, А. П. Усатый, В. С. Баранник, 2017

задаче оптимизации турбинных решеток, где должны учитываться геометрические критерии качества не только формы обвода турбинного профиля, но и канала.

Цель работы

Разработка метода многокритериальной оптимизации турбинных решеток с использованием геометрических критериев качества как формы обвода профиля, так и канала.

Изложение основного материала Объект исследований

В данной работе объектом оптимизационных исследований является турбинная решетка, профили которой описываются *BiArc*-кривыми [18], см. рис. 1.

Постановка задачи оптимизации

Задачу многокритериальной оптимизации турбинной решетки с использованием геометрических критериев качества профиля и канала для формирования соответствующих целевых функций, а также геометрических (конструктивных) и функциональных ограничений можно представить следующим образом

$$\begin{cases} \vec{Y}^{\text{opt}}(\vec{x}_k^{\text{opt}}) = \max \vec{Y}(\vec{x}_k), \\ \vec{x}_k \in X, \vec{v}(\vec{x}_k) \in V, \\ \vec{Y}(Y_1(\vec{x}_k), Y_2(\vec{x}_k), \dots, Y_n(\vec{x}_k)), \\ N_{X_{\min}} \leq |X| \leq N_{X_{\max}} < \infty, \\ N_{V_{\min}} \leq |V| \leq N_{V_{\max}} < \infty, \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{Y} – вектор целевых функций; \vec{x}_k – вектор конструктивных (оптимизируемых) параметров; \vec{v} – вектор функциональных ограничений; V, X – области существования функциональных и конструктивных ограничений; $N_{V_{(\min, \max)}}$, $N_{X_{(\min, \max)}}$ – границы областей существования соответствующих ограничений.

То есть, решение задачи многокритериальной оптимизации турбинной решетки заключается в отыскании соответствующего допустимого (удовлетворяющего ограничениям) проектного решения (\vec{x}_k^{opt}), реализация которого дает экстремальное значение вектора целевых функций ($\vec{Y}^{\text{opt}}(\vec{x}_k^{\text{opt}})$).

Формирование вектора геометрических критериев качества турбинной решетки

1 Выбор геометрических критериев качества турбинного профиля

Как показывает опыт, для оценки качества

турбинного профиля наиболее целесообразно использовать геометрический критерий качества «минимум максимальной кривизны», применив его для кривых, которые будут описывать спинку и животик профиля. Вместе с тем, учитывая, что в данной работе контуры профилей будут описываться дугами окружностей (*BiArc*-кривыми), применение геометрического критерия качества «минимум максимальной кривизны» в строгом математическом определении его сути может внести определенные сложности, вызванные скачкообразным изменением значения данного критерия при переходе от одной дуги к другой. Этот факт может негативно повлиять на непрерывность функции свернутого критерия качества турбинной решетки. С учетом этого в работе был применен некий аналог геометрического критерия «минимум максимальной кривизны», суть которого заключается в минимизации суммы разностей величин кривизны соседних дуг. Сумма этих разностей у оптимального профиля должна быть минимальна. В формальном виде для спинки и животика эти критерии будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} k_s = \sum_{i=1}^{N_s-1} abs(1/R_{s(i)} - 1/R_{s(i+1)}), \\ k_g = \sum_{i=1}^{N_g-1} abs(1/R_{g(i)} - 1/R_{g(i+1)}), \\ \max |k_s| \rightarrow \min, \max |k_g| \rightarrow \min, \end{cases} \quad (2)$$

где k_s, k_g – геометрические критерии качества спинки и животика профиля; N_s, N_g – количество дуг на спинке и животике профиля; R_s, R_g – радиусы дуг спинки и животика, соответственно.

В пределе минимум этих критериев качества приводит к набору дуг одного радиуса, т.е. к кривой с постоянной кривизной. В практике профилирования турбинных профилей подобные решения отсутствуют, т.к. граничные условия для построения профилей исключают такую возможность. Вместе с тем минимизация целевой функции, построенной с использованием критериев (2) приводит к получению *BiArc*-кривых с минимально возможными скачками кривизны в точках сопряжения дуг окружностей, что соответствует «духу» геометрического критерия качества «минимум максимальной кривизны».

2 Выбор геометрических критериев качества канала

Для оценки качества канала решетки были формализованы общеизвестные геометрические характеристики канала, влияющие на эффективность течения. В число этих характеристик были включены:

- 1) плавность и длина средней линии канала;

- 2) плавность изменения конфузорности канала;
- 3) угол поворота средней линии канала;
- 4) степень конфузорности канала.

Перечисленные выше характеристики определялись в промежутке между входным и выходным горлами канала.

Для оценки плавности средней линии и плавности изменения конфузорности канала (линия 1 и линия 2 на рис. 1) использовались геометрические критерии качества «минимум максимальной кривизны» и/или «минимум потенциальной энергии изгиба» кривых, отражающих характер изменения перечисленных характеристик канала (п. 1, 2). Прежде чем оценить данные характеристики, предварительно определялись координаты точек средней линии канала и радиусы вписанных окружностей в канал решетки. Затем в соответствии с координатами точек средней линии канала и радиусов вписанных окружностей строились соответствующие кубические интерполяционные сплайны вида (3)

$$\begin{cases} S_{i(l)} = a_{(l)} + (b_{(l)} + (C_{(l)}/2 + \Delta x \cdot d_{(l)}/6)\Delta x)\Delta x, \\ S'_{i(l)} = b_{(l)} + c_{(l)} \cdot \Delta x + d_{(l)} \cdot \frac{\Delta x^2}{2}, \\ S''_{i(l)} = c_{(l)} + d_{(l)} \cdot \Delta x, \end{cases} \quad (3)$$

где $a_{(l)}, b_{(l)}, c_{(l)}, d_{(l)}$ – коэффициенты кубического сплайна (для l -го участка). Длина участка сплайна определяется расстоянием между соседними точками средней линии канала решетки; $S_{i(l)}$ – значение сплайна в рассчитываемой точке; $S'_{i(l)}, S''_{i(l)}$ – первая и вторая производные сплайна; Δx – расстояние между x координатой начального узла l -го участка сплайна и x координатой рассчитываемой точки.

Использование сплайнов (3) позволяет оценивать влияние геометрических критериев качества средней линии канала и зависимости, описывающей изменение степени конфузорности канала между входным и выходным горлами на вектор целевых функций (1). Геометрические критерии качества средней линии канала и зависимости, описывающей изменение степени конфузорности вдоль канала определяются по формулам (4) или (5).

$$\begin{cases} k_m = S''_m / (1 + S'^2_m)^{1.5}, \\ k_c = S''_c / (1 + S'^2_c)^{1.5}, \\ \max|k_m| \rightarrow \min, \max|k_c| \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4)$$

Использование зависимостей (4) позволит построить решетки турбинных профилей, у которых средние линии канала и линии, описывающие изменение конфузорности канала будут иметь минимальное из возможного значения максимальной

кривизны. Если воспользоваться зависимостями (5), то отмеченные кривые будут такой формы, при которой значение потенциальной энергии их изгиба будет минимальным.

$$\begin{cases} k_m = \int_{x_0}^{x_n} \frac{S''^2_m}{(1 + S'^2_m)^3} dx, \\ k_c = \int_{x_0}^{x_n} \frac{S''^2_c}{(1 + S'^2_c)^3} dx, \\ \max|k_m| \rightarrow \min, \max|k_c| \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

Общеизвестным является факт отрицательного обратнопропорционального влияния угла поворота потока в канале на эффективность канала. С учетом этого, для минимизации потерь в канале в качестве геометрического критерия качества канала был введен угол поворота потока в канале между входным и выходным горлами. Значение этого угла определяется по зависимостям (6).

$$\begin{cases} k_p = 180 - (\beta_{1thr} + \beta_{2eff}), \\ |k_p| \rightarrow \min, \\ \beta_{1thr} = \arcsin(a_1/t), \\ \beta_{2eff} = \arcsin(a_2/t), \end{cases} \quad (6)$$

где a_1, a_2, t – входное, выходное горла и шаг решетки профилей, соответственно (рис. 1).

Одной из важнейших геометрических характеристик каналов турбинных решеток является степень конфузорности канала. Чем больше конфузорность канала тем выше его эффективность. Учитывая, что все рассмотренные выше геометрические критерии качества были сформированы таким образом, что их минимизация должна вести к повышению эффективности турбинных решеток, в качестве геометрического критерия качества была выбрана величина обратная степени конфузорности канала. Минимизация этого критерия качества (7) будет вести к росту степени конфузорности и положительному влиянию на эффективность турбинной решетки

$$\begin{cases} k_{sc} = a_2/a_1, \\ |k_{sc}| \rightarrow \min. \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая, что выходное горло канала соответствует эффективному углу выхода решетки (β_{2eff} , см. рис. 1), который не изменяется в процессе оптимизации, то по сути поиск оптимального решения с учетом геометрического критерия качества (7), отвечающего за конфузорность канала будет направлена на увеличение входного горла a_1 .

И последним геометрическим критерием качества, влияющим на эффективность турбинной решетки, который используется в предлагаемом

методе, является длина средней линии канала на участке между входным и выходным горлами. Минимизация данного критерия будет вести (по возможности) к получению менее изогнутых (более прямых) каналов, что безусловно положительно будет сказываться на эффективности турбинной решетки. Зависимость формализующая данный критерий качества приведена ниже

$$\begin{cases} k_{ml} = \sum_{i=1}^{N_m} l_{mi}, \\ |k_{ml}| \rightarrow \min, \end{cases} \quad (8)$$

$$\|K\| = \sqrt{\left(\frac{\mu_s k_s}{k_s^p}\right)^2 + \left(\frac{\mu_g k_g}{k_g^p}\right)^2 + \left(\frac{\mu_m k_m}{k_m^p}\right)^2 + \left(\frac{\mu_c k_c}{k_c^p}\right)^2 + \left(\frac{\mu_p k_p}{k_p^p}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sc} k_{sc}}{k_{sc}^p}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{ml} k_{ml}}{k_{ml}^p}\right)^2}, \quad (9)$$

где μ – весовые коэффициенты соответствующих критериев качества, а k^p – значения соответствующих критериев качества, вычисленных для решетки-прототипа. Таким образом, зависимость (9) по существу, определяет модуль вектора частных геометрических критериев качества в нормированном (относительном) виде с учетом их весовых коэффициентов (μ).

По своей сути, используемый вид свертки, аналогичен свертке метода идеальной точки, которая, в свою очередь, близка, к свертке Гермейера [20]. Известно, что метод идеальной точки и метод свертки Гермейера, в отличие от метода взвешенных критериев (аддитивной свертки), позволяют находить решения, лежащие как на выпуклой, так и на невыпуклой части фронта Парето.

Решая задачу минимизации $\|K\|$ мы находим точки в критериальном пространстве, наименее удаленные от начала координат, получая, таким образом, множество недоминируемых решений, соответствующих Парето-фронт.

Функциональные ограничения в задаче оптимизации турбинных решеток

В соответствии с (1) компонентами вектора функциональных ограничений \vec{v} в данной задаче являются параметры, описывающие прочностные характеристики профиля. К ним, в первую очередь, относятся площадь (F_p), момент сопротивления (W_p) и максимальная толщина профиля (C_p).

Оптимизируемые параметры в задаче оптимального проектирования турбинной решетки

Как видно из рис. 1, в самом общем виде в

где N_m – число узлов сплайна, описывающего среднюю линию канала (3) на участке между входным и выходным горлами; l_{mi} – длина i -го участка сплайна.

Таким образом задача оптимального проектирования турбинной решетки является задачей многокритериальной оптимизации. Для решения подобных задач существует множество подходов, наиболее часто данную задачу с помощью специальной свертки сводят к однокритериальной. В данной работе используется метод свертки, основанный на вычислении расстояния между центром координат многокритериального пространства и точкой, соответствующей текущему варианту турбинной решетки в этом пространстве (9) [19].

число оптимизируемых параметров могут быть включены следующие характеристики профиля, влияющие на форму его обводов, форму канала и как следствие на эффективность турбинной решетки:

- 1) геометрический угол входа (β_{1g});
- 2) геометрический угол выхода (β_{2g});
- 3) радиус входной кромки (r_1);
- 4) угол установки профиля (β_y);
- 5) угол заострения входной кромки (ω_1);
- 6) угол заострения выходной кромки (ω_2);
- 7) угол отгиба выходной кромки (δ);
- 8) относительный шаг решетки ($\bar{t} = t/b$),

или число лопаток решетки.

Кроме перечисленных выше геометрических характеристик профиля и канала в число оптимизируемых параметров турбинной решетки, не зависимо от постановки оптимизационной задачи, автоматически включаются параметры, влияющие на положение точки сопряжения двух дуг окружностей каждого участка *BiArc*-кривых и соответственно на соотношение кривизны этих дуг. При использовании методики построения обводов турбинных профилей с помощью *BiArc*-кривых, это будут три нормированных коэффициента $0 < k < 1$ (см. [18]). Первый коэффициент k_1 для участка *BiArc*-кривой на спинке профиля между выходной кромкой и точкой горла, второй коэффициент k_2 – на участке между точкой горла и входной кромкой и третий коэффициент k_3 для участка *BiArc*-кривой, описывающей животик профиля.

Таким образом, при решении задачи оптимизации турбинной решетки в наиболее общей постановке размерность вектора целевых функций (\vec{Y}) будет равна восьми, размерность вектора оптимизируемых параметров (\vec{x}_k) равна 11 и

размерность вектора функциональных ограничений (\vec{v}) равна трем.

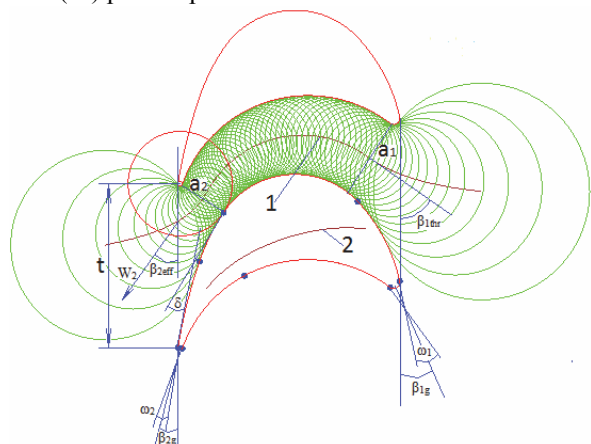


Рис. 1 – Решетка профилей – объект оптимизационного исследования: 1 – средняя линия канала; 2 – линия изменения кривизны канала

Краткое описание алгоритма оптимизации

Для решения задачи многокритериальной оптимизации турбинных решеток в данной работе используется методика [21], основанная на поэтапном применении ЛПт последовательности, метода роя пчел и одного из градиентных методов. На этапах ЛПт-поиска и метода роя пчел,

промежуточные варианты турбинных решеток в которых не выполняются заданные функциональные ограничения отбрасываются и не участвуют в дальнейшем конкурсе. На этапе с использованием градиентных методов учет функциональных ограничений осуществляется методом штрафных функций.

Предлагаемый метод оптимизации турбинных решеток реализован в виде подсистемы профилирования и оптимального проектирования турбинных решеток (рис. 2) и интегрирован в САПР «Турбоагрегат» [21].

Пример решения задачи многокритериальной оптимизации турбинных решеток с использованием геометрических критериев качества обводов профиля и канала

Ниже приведены результаты оптимизации рабочей решетки корневого сечения первой ступени давления турбины К-800-23,5. При оптимизации в число оптимизируемых параметров были включены пять геометрических характеристик: геометрический угол выхода (β_{2g}), угол установки профиля (β_y), углы заострения входной и выходной кромок (ω_1, ω_2) и угол отгиба выходной кромки (δ). Значение целевой функции оценивалось в соответствии с (9). Ограничения в процессе оптимизации не накладывались.

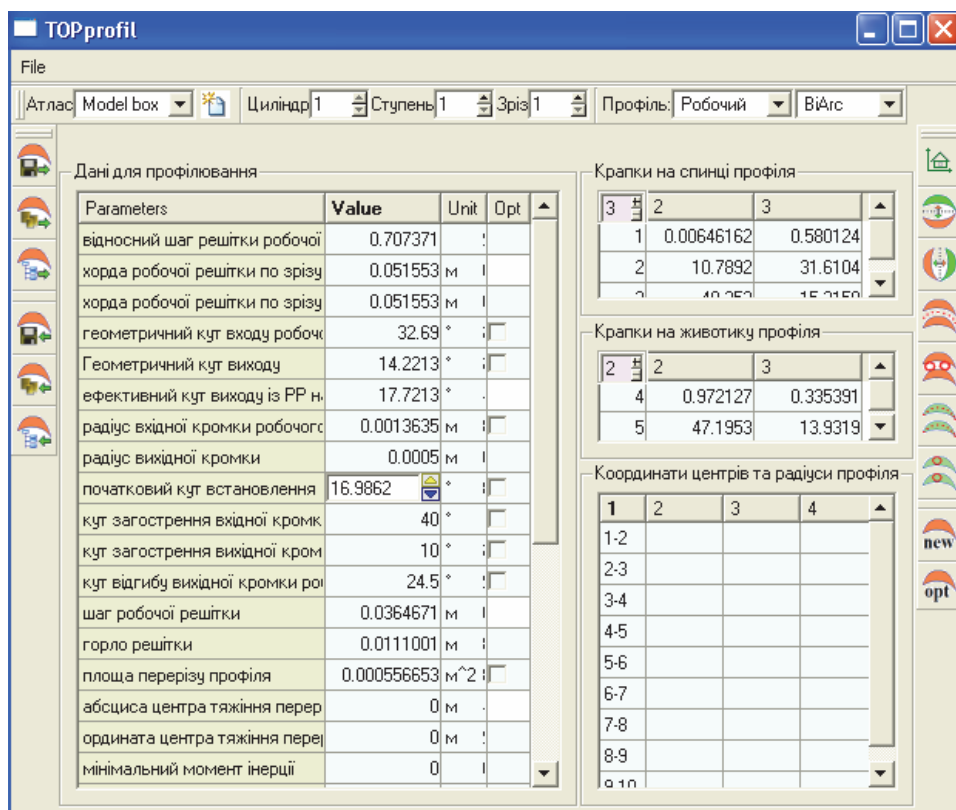


Рис. 2 – Диалоговое окно подсистемы оптимального проектирования турбинных решеток САПР «Турбоагрегат»

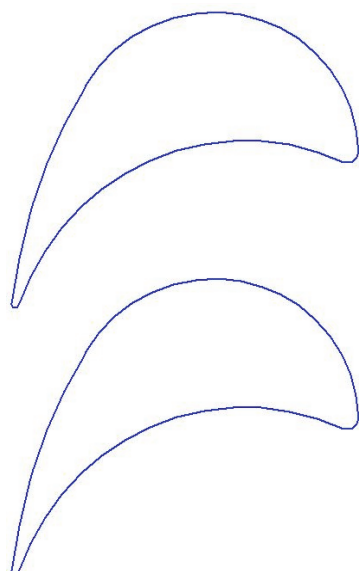


Рис. 3 – Фрагмент турбинної решетки оптимальних профілей O1

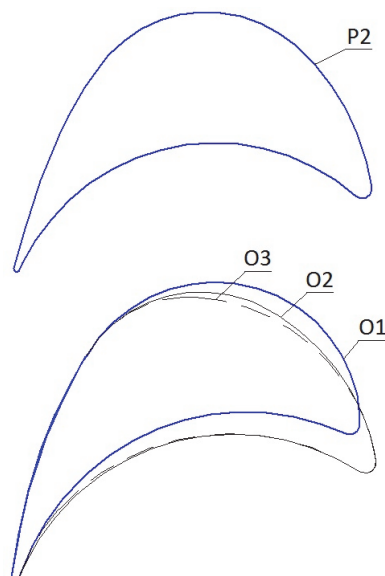


Рис. 4 – Форми обводів профіля P2 і профілей O1, O2, O3, отриманих в результаті оптимізації турбинної решетки

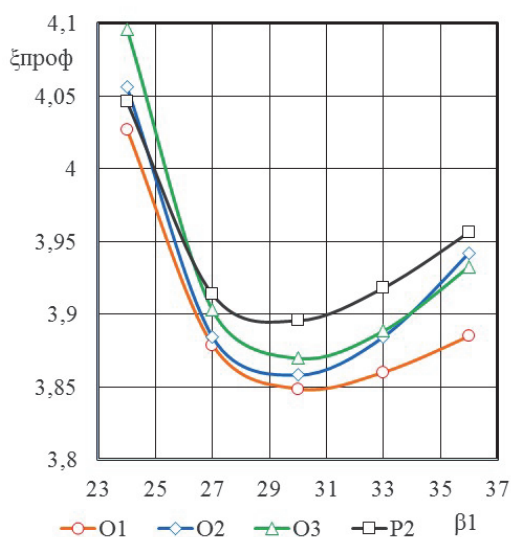


Рис. 5 – Коефіцієнти профільних втрат турбинних решіток з профілем P2 і профілями O1, O2, O3, отриманими в результаті оптимізації

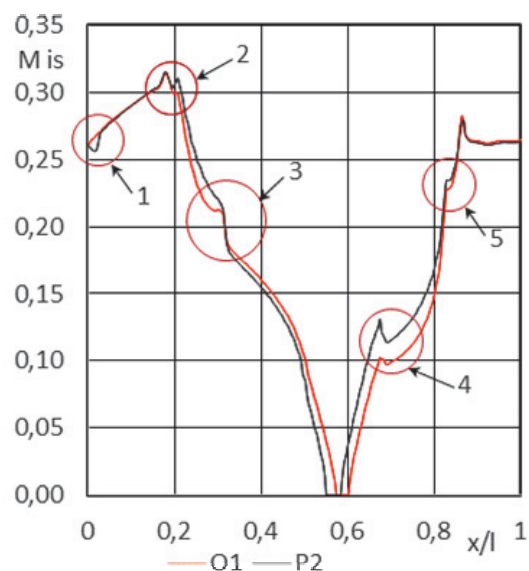


Рис. 6 – Розподілення чисел Маха вдоволь обводу профілей: атласного P2 і оптимального O1

Предварительные тепловые расчеты проточной части турбины К-800-23,5 показали, что в корневом сечении первой ступени давления наблюдается натекание потока пара с существенным углом удара ($\Delta\beta_1 = 9^\circ$) в «животик» ($\beta_1 = 24^\circ$, а $\beta_{1g} = 33^\circ$). Поэтому желательно было получить турбинную решетку, эффективно работающую в широком диапазоне углов натекания.

Многокритериальность задачи оптимального проектирования турбинной решетки привела к

мульти-modalности целевой функции (9), что подтвердили результаты поиска оптимальных решений на этапе применения метода роя пчел. В результате решения поставленной оптимизационной задачи были получены три варианта оптимальных рабочих решеток (O1, O2, O3), геометрия которых достаточно сильно отличается, как между собой, так и в сравнении с прототипом (решетка, составленная из атласных профилей P2) для корневого сечения первой ступени давления турбины К-800-23,5, см. рис. 3, 4.

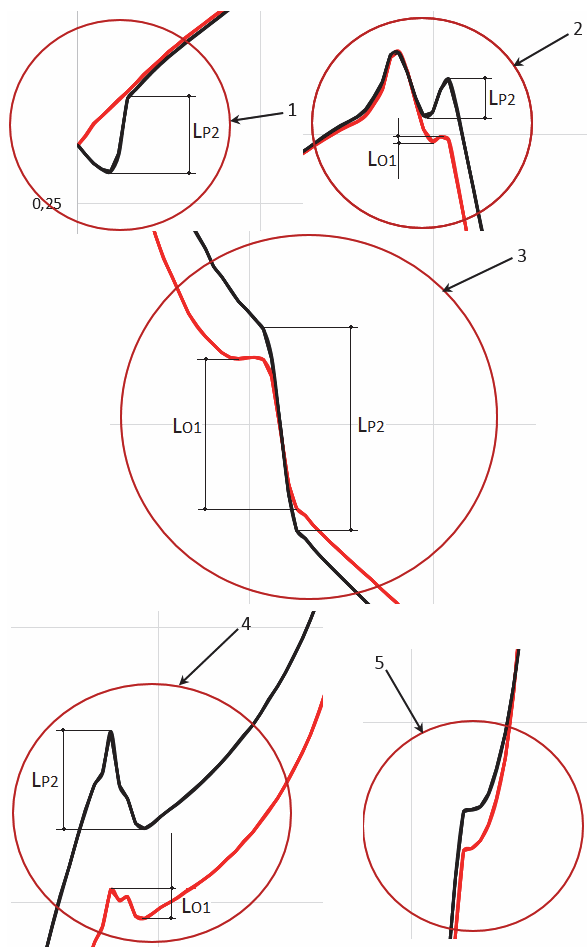


Рис. 7 – Существенные отличия в распределении чисел Маха вдоль обвода профилей: атласного P2 и оптимального O1; L_{P2} , L_{O1} – амплитуды скачков скорости обтекания профилей P2 и O1 соответственно

В первую очередь следует отметить увеличение углов установки профилей у оптимальных вариантов турбинной решетки по сравнению с прототипом. Особенно это заметно в решетке O1. Кроме этого у оптимальных вариантов были увеличены углы заострения входной и выходной кромок профилей.

После оптимизации в соответствии с предложенной методикой и проведения верификационных расчетов, полученные оптимальные решетки O1, O2 и O3, а также рабочая решетка-прототип, составленная из атласных профилей P2 были рассчитаны с использованием 3D программного комплекса.

Наиболее эффективной оказалась турбинная решетка O1 (глобальный оптимум), см. рис. 5, 6.

Анализируя данные на рис. 5. Видно, что оптимальная турбинная решетка O1 превосходит остальные решетки, в том числе и решетку-прототип, составленную из атласного профиля P2 во всем диапазоне углов натекания. Следует также

отметить, что решетки O2 и O3 (локальные оптимумы) уступают по эффективности решетке-прототипу P2 только в зоне малых углов натекания. Во всем остальном диапазоне изменения углов натекания решетки O2 и O3, также, как и решетка O1 превосходят по эффективности решетку P2.

Определение физической сути аэродинамических явлений, обеспечивших более высокую эффективность оптимальных решеток проведем с помощью сравнительного анализа характеристик решетки-прототипа (профиль P2) и наиболее эффективной оптимальной решетки O1, которая соответствует глобальному оптимуму задачи (1). Так, на рис. 6 приведены распределения чисел Маха вдоль обводов профиля P2 и O1.

Как видно из рис. 6, обтекания вдоль обводов этих профилей очень похожи. Вместе с тем, в некоторых местах, отмеченных цифрами 1, 2, 3, 4 и 5 имеются достаточно важные отличия, которые показаны на рис. 7 в более крупном масштабе.

В частности, на спинках профилей P2 и O1 имеются места достаточно синхронных скачков изменения скоростей обтекания (участки 2 и 3, см. рис. 6, 7). Однако амплитуда этих скачков у оптимального профиля O1 (L_{O1}) несколько меньше чем у профиля P2 (L_{P2}). Кроме этого, на участке 1, близком к выходной кромке, со стороны спинки имеется локальное падение и возрастание скорости обтекания у профиля P2, в то время, как у оптимального профиля O1 такой скачок скоростей отсутствует, что обеспечивает плавное падение скорости в области косога среза решетки O1. Аналогичные отличия обтекания профилей P2 и O1 наблюдаются и на животиках (участок 4). Кроме этого, следует отметить и факт более плавного нарастания скорости на спинке профиля O1 по сравнению с профилем P2 и соответственно более резкое нарастание скорости на животике профиля O1 по сравнению с профилем P2. Последнее способствовало уменьшению толщины пограничного слоя со стороны животика у оптимального профиля O1. В то же время более плавное нарастание скорости на спинке профиля стало своего рода «предохранителем» ухудшения обтекания и появления возможных отрывов потока при различных углах натекания. Отмеченные отличия и стали основной причиной более высокой эффективности оптимальной решетки, составленной из профилей O1 по сравнению с решеткой-прототипом P2.

Ниже на рис. 8, 9 приведены распределения давлений и скоростей в каналах решеток P2 и O1.

По распределению полного давления (рис. 8) видно, что пограничный слой в области горла на стороне разрежения у профиля O1 существенно меньше, чем у профиля P2. Распределение (рис. 9) скорости показывает меньшую скорость на входном участке стороны давления профиля O1, однако при визуализации это не столь заметно.

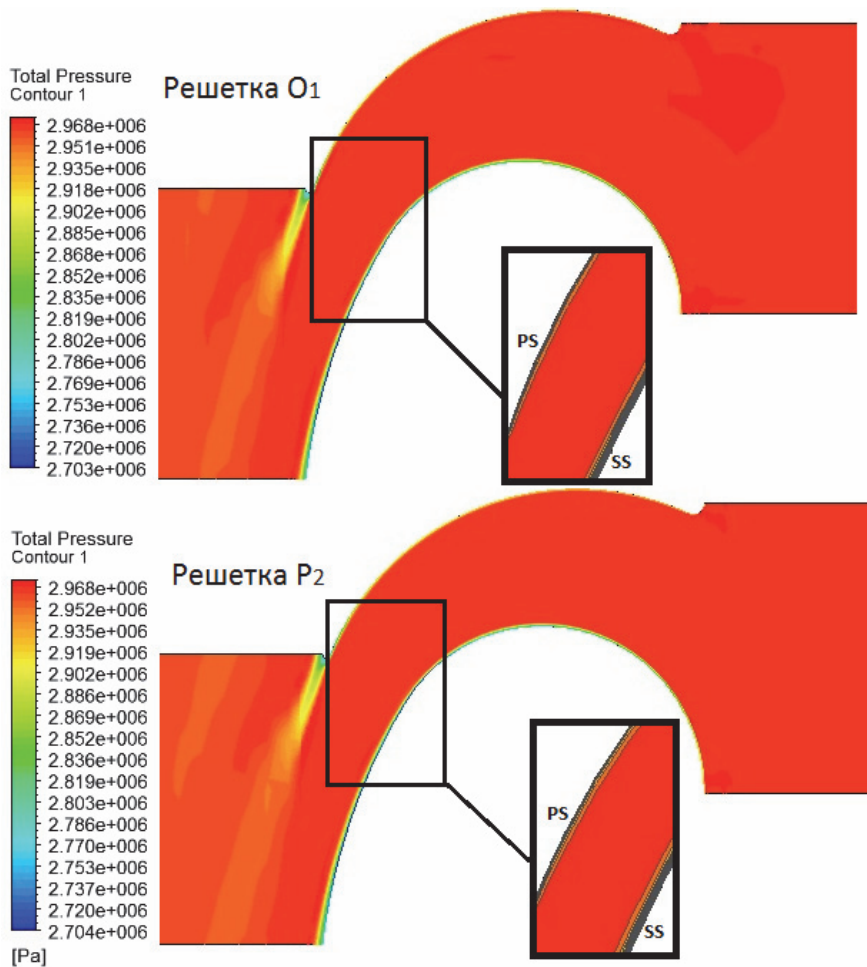


Рис. 8 – Распределение полного давления в каналах решеток P2 и оптимальной O1

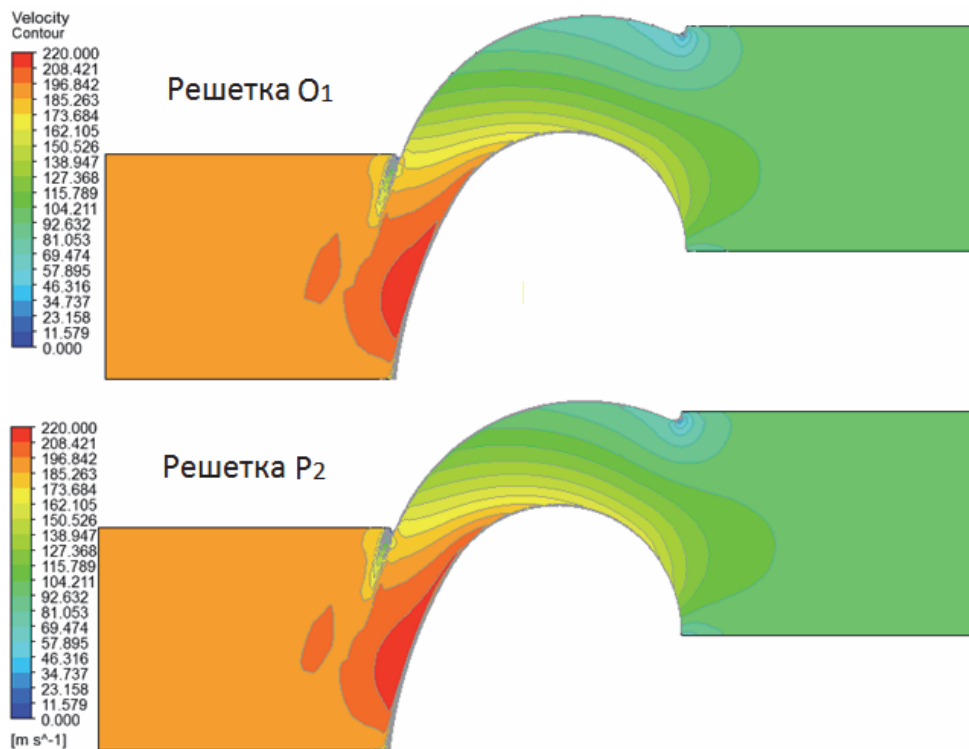


Рис. 9 – Распределение скоростей в каналах решеток P2 и оптимальной O1

Обсуждение результатов

В настоящее время существует ряд методов построения профилей турбинных решеток, с помощью которых (используя параметры управления) можно целенаправленным поиском получать наилучшие из множества построенных турбинных профилей. Предлагаемый в статье метод, развивает возможности существующих методов, переводя задачу оптимизации обводов профиля в задачу оптимизации турбинной решетки. При этом в процессе оптимизации учитываются показатели качества не только профиля, но и канала турбинной решетки. Следует подчеркнуть, что ввиду сложности комплексного критерия качества и количества параметров, влияющих на эффективность турбинных решеток и профилей, функция цели является мультимодальной. Как показали наши расчеты, ввиду уже высокой эффективности исходных профилей значения КПД турбинных решеток, построенных из оптимальных профилей в экстремальных точках отличаются незначительно. Поэтому поиск наилучшего решения (точка глобального экстремума) потребовал применения довольно сложного алгоритма его поиска – сочетания ЛПТ последовательности, метода роя пчел, метода штрафных функций и градиентных методов. Однако, при правильной организации и последовательности их применения построение эффективных турбинных решеток и образующих их профилей предлагаемым методом не требует больших затрат машинного времени и при этом гарантируется хорошая сходимости вычислительного процесса. В результате, проведенных оптимизационных исследований, полученная турбинная решетка и профиль, соответствующие глобальному оптимуму, показали преимущество в эффективности по сравнению с решеткой-прототипом, построенной с использованием атласного профиля P2 во всем диапазоне углов натекания. Дополнительный выигрыш в эффективности оптимальной решетки составил (0,47–1,81) % относительных.

Эффективность предлагаемого метода оптимального проектирования турбинных решеток была проверена на множестве турбинных решеток, построенных из профилей, формы обводов которых описывались *BiArc*-кривыми (дугами окружностей). Поэтому, предлагаемый метод построения оптимальных турбинных решеток и профилей, пополняя множество существующих методов, приобретает особую полезность и ценность для предприятий, использующих фрезерную технологию изготовления пера турбинных лопаток.

Выводы

1 Разработан метод и алгоритм многокритериальной оптимизации турбинных решеток с использованием геометрических критериев качества

формы обводов профиля и канала.

2 Выполнена оптимизация турбинной решетки для корневого сечения первой ступени давления турбины К-800-23,5.

3 Получены три альтернативных оптимальных решения турбинных решеток с эффективностью больше чем у решетки-прототипа на базе атласных профилей P2.

4 Показано, что оптимальная решетка, соответствующая глобальному оптимуму во всем диапазоне углов натекания, имеет коэффициент профильных потерь меньше чем у решетки-прототипа, составленной из атласных профилей P2 на (0,47–1,81) % относительных.

5 Приведен анализ физических причин более высокой эффективности оптимальной турбинной решетки.

Список литературы

- 1 **Бойко, А. В.** Оптимальное проектирование проточной части осевых турбин: моногр. / **А. В. Бойко**. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1982. – 152 с.
- 2 **Аронов, Б. М.** Профилирование лопаток авиационных газовых турбин / **Б. М. Аронов, М. И. Жуковский, В. А. Журавлев**. – Москва: Машиностроение, 1975. – 192 с.
- 3 **Бойко, А. В.** Проектирование оптимальных турбинных профилей с помощью кубических интерполяционных сплайнов / **А. В. Бойко, А. П. Усатый, В. С. Баранник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 31–36. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.04.
- 4 **Fazil, J.** Investigation of airfoil profile design using reverse engineering Bezier curve / **J. Fazil, V. Jayakumar** // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2011. – № 7. – Р. 43–52. – ISSN 2466-4308.
- 5 **Кожевников, С. Н.** Геометрический критерий плавности контура профиля турбинной лопатки / **С. Н. Кожевников** // Известия высших учебных заведений. Серия: Энергетика. – Минск, 1989. – С. 91–93.
- 6 **Субботович, В. П.** Результаты профилирования с помощью обратной задачи теории решеток турбомашин / **В. П. Субботович, А. Ю. Юдин, Фан Конг Там** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 2 – С. 31–35. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.
- 7 **Русанов, А. В.** Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин / **А. В. Русанов, Н. В. Пащенко, А. И. Косьянова** // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 2, № 7. – С. 32–37. – ISSN 1729-3774.
- 8 **Ершов, С. В.** Аэродинамическая оптимизация лопаточных аппаратов турбин: подходы, методы, результаты / **С. В. Ершов, В. А. Яковлев** // Проблемы машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 2. – С. 3–13. – ISSN 0131-2928.

- 9 **Mengistu, T.** Aerodynamic shape optimization of turbine blades using a design-parameter-based shape representation / **T. Mengistu, W. Ghaly, T. Mansour** // Proc. ASME Turbo Expo. – 2007. – Paper GT-28041.
- 10 **Гукасова, Е. А.** Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов паровых и газовых турбин / **Е. А. Гукасова, М. И. Жуковский, Л. М. Зысина-Моложен** и др. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 167 с.
- 11 **Мельтюхов, В. А.** Оценка качества новых турбинных решеток профилей для режимов диффузорного и конфузорного течений : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 – турбомашин / **Мельтюхов Виктор Алексеевич.** – Харьков, 1986. – 205 с.
- 12 **Гречаниченко, Ю. В.** Вторичные течения в решетках турбомашин / **Ю. В. Гречаниченко, В. А. Нестеренко.** – Харьков : Вища школа, 1983. – 120 с.
- 13 **Дейч, М. Е.** Экспериментальное исследование сопловой решетки с уменьшенными концевыми потерями / **М. Е. Дейч, Ш. В. Деллер, Б. А. Коршунов** // Теплоэнергетика. – 1994. – № 10. – С. 39–42.
- 14 Профили направляющих лопаток постоянного сечения паровых стационарных турбин. Типы, основные параметры и размеры. ОСТ 108.260.01-84. – Москва, 1984. – 59 с.
- 15 Профили рабочих лопаток постоянного сечения паровых стационарных турбин. Типы, основные параметры и размеры. ОСТ 108.260.02- 84. – Москва, 1984. – 23 с.
- 16 **Бурлака, М. В.** Аэродинамическая оптимизация направляющих решеток осевых турбин : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.16 – турбомашин и турбоустановки / **Бурлака Максим Васильевич.** – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 167 с.
- 17 **Баранник, В. С.** Пространственная аэродинамическая оптимизация направляющей решетки осевой турбины : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.16 – турбомашин и турбоустановки / **Баранник Валентин Сергеевич.** – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – 144 с.
- 18 **Бойко, А. В.** Использование BiArc-кривых для описания контура турбинных профилей / **А. В. Бойко, А. П. Усатый** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 20–27. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.03.
- 19 **Boiko, A., Govorushchenko, Y. and Usaty, A.** (2016), Optimization of the Axial Turbines Flow Paths : monograph. – New York : Science Publishing Group, 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A, 2016. – 272 p. – ISBN 978-1-940366-67-8. – Mode of access: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8>. – 12.01.2017.
- 20 **Гермейер, Ю. Б.** Введение в теорию исследования операций / **Ю. Б. Гермейер.** – Москва : Наука, 1971. – 220 с.
- 21 **Усатый, А. П.** Всережимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве : дис. ... д-р техн. наук : 05.05.16 / **Усатый Александр Павлович.** – Харьков, 2012. – 418 с. – Библиогр.: С. 359–376.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Boiko, A. V.** (1982), *Optimal design of the axial turbine flow path*, Vishcha school. Publishing house at Kharkov Un-ty, Kharkov, Russian.
- 2 **Aronov, B. M., Zhukovsky, M. I. and Zhuravlev, V. A.** (1975), *Profiling the blades of aviation gas turbines*, Engineering, Moscow.
- 3 **Boiko, A. V., Usaty, A. P. and Barannik, V. S.** (2016), "Designing Optimal Turbine Profiles Using Cubic Interpolation Spline", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1181), pp. 31–36, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.04.
- 4 **Fazil, J. and Jayakumar, V.** (2011), "Investigation of airfoil profile design using reverse engineering Bezier curve", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, No. 7, pp. 43–52, ISSN 2466-4308.
- 5 **Kozhevnikov, S. N.** (1989), "Geometric criterion of contour profile smoothness of the turbine blades", *Proceedings of the higher educational institutions. Series: Energy*, pp. 91–93, Minsk.
- 6 **Subotovich, V. P., Yudin, A. Yu. and Phan Cong Tam** (2007), "The Results of Designing of Turbine Nozzle Profile Cascades with the Help of the Solution Method of Inverse Problem", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 2, pp. 31–35, ISSN 2078-774X,
- 7 **Rusanov, A. V., Pashchenko, N. V. and Kosyanova, A. I.** (2009), "Analytical method of blade profiling of axial turbines flow paths", *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, Vol. 2, No. 7, pp. 32–37, ISSN 1729-3774.
- 8 **Yershov, S. V. and Yakovlev, V. A.** (2012), "Aerodinamicheskaja optimizacija lopa-tochnyh apparatov turbin: podhody, metody, rezul'taty [Aerodynamic optimization of turbine blades: approaches, methods, results]", *Probl. of engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 3–13, ISSN 2466-4308.
- 9 **Mengistu, T., Ghaly, W. and Mansour, T.** (2007), "Aerodynamic shape optimization of turbine blades using a design-parameter-based shape representation", *Proc. ASME Turbo Expo*, Paper GT-28041.
- 10 **Gukasova, He. A., Zhukovsky, M. I., Zisina-Molozhen, L. M. et al** (1961), *Aerodynamic improvement of steam and gas turbines grids*, Gosenergoizdat, Moscow, Russia.
- 11 **Meltiuhov, V. A.** (1986), *Quality evaluation of the new turbine grids for diffuser and acceleration flows*, Ph. D. thesis, Kharkov, Ukraine.
- 12 **Grechanichenko, Yu. V. and Nesterenko, V. A.** (1983), *Vtorichnye techenija v reshetkah turbomashin*, Vishcha Shkola, Kharkov, Ukraine.
- 13 **Deych, M. E., Deller, Sh. V. and Korshunov, B. A.** (1994), "Jeksperimental'noe issledovanie soplovoj reshetki s umen'shennymi koncevymi poterjami [Experimental investigation of a nozzle array with reduced end losses]", *Thermal engineering*, No.10, pp. 39–42.
- 14 (1984), OST 108.260.01-84. The nozzles profiles of permanent section of the stationary steam turbines. The types, basic parameters and dimensions, Moscow.
- 15 (1984), OST 108.260.02-84. The working blades profiles of permanent section of stationary steam turbines. The types, basic parameters and dimensions, Moscow.

- 16 **Burlaka, M. V.** (2011), "Ajerodinamicheskaia optimizacija napravljajushhiih reshetok osevyh turbin [Axial turbines guide blade rim aerodynamics optimization]", Ph. D. thesis, NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
- 17 **Barannik, V. S.** (2016), "Prostranstvennaja ajerodinamicheskaia optimizacija napravljajushhej reshetki osevoj turbiny [The three-dimensional aerodynamic optimization of axial turbine nozzle cascade]", Ph. D. thesis, NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
- 18 **Boiko, A. and Usaty, A.** (2017), "Use Blarc-Curves for Contour Description of the Turbine Profiles", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 20–27, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.03.
- 19 **Boiko, A., Govorushchenko, Y. and Usaty, A.** (2016), *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths*, Published by Science Publishing Group 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A, ISBN 978-1-940366-67-8, available at: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8> (accessed 12 January 2017).
- 20 **Germayer, Yu. B.** (1971), *Vvedenie v teoriju issledovanija operacij [Introduction to the theory of operations research]*, Nauka, Moscow, Russia.
- 21 **Usaty, A. P.** (2012), *Multi-mode multi-parameters multi-criterion optimization of the turbine flow path in the integrated information space*, D. Sc. thesis, NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.

Сведения об авторах (About authors)

Бойко Анатолий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: aboiko@kpi.kharkov.ua, ORCID 0000-0003-4549-3577.

Boiko Anatoly – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Усатый Александр Павлович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: alpaus@ukr.net, ORCID 0000-0002-8568-5007.

Usaty Alexander – Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Баранник Валентин Сергеевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: Valentin.Barannik@gmail.com, ORCID 0000-0002-1472-0143.

Barannik Valentine – Junior Researcher, Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Бойко, А. В. Оптимизация турбинных решеток с использованием геометрических критериев качества обвода профиля и канала / **А. В. Бойко, А. П. Усатый, В. С. Баранник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 6–16. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.01.

Please cite this article as:

Boiko, A., Usaty, A. and Barannik, V. (2017), "Optimization of the Turbine Grids Using Geometric Quality Criteria for Circumscription of the Profile and Channel", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 6–16, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.01.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Бойко, А. В. Оптимізація турбінних решіток з використанням геометричних критеріїв якості обводів профілю і каналу / **А. В. Бойко, А. П. Усатий, В. С. Баранник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 6–16. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.01.

АНОТАЦІЯ У роботі запропонована методика багатокритеріальної оптимізації турбінних решіток з використанням геометричних критеріїв якості турбінних профілів (описаних ВіArc-кривими) і утворених ними каналів. Розглянуто особливості запропонованої методики, а також наведено математичний опис запропонованого комплексу геометричних критеріїв, що описують якість як турбінних профілів, так і створених з їхньою допомогою каналів. Описано метод оптимізації та алгоритми згортки і нормування комплексу геометричних критеріїв якості. Наведені приклади оптимальних турбінних решіток і профілів. Дано результати порівняльних численних досліджень ефективності оптимальних турбінних решіток, отриманих за допомогою запропонованого методу оптимізації та турбінної решітки, побудованої з використанням атласного профілю P2. Показано вища ефективність оптимальних турбінних решіток і пояснена фізична природа отриманих результатів.

Ключові слова: Оптимізація турбінної решітки, геометричні критерії якості, ВіArc-крива, порівняльний чисельний експеримент.

Поступила (received) 08.02.2017