

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ С ДЕФЛЕКТОРОМ ВНУТРИ

© 2024

- Г. М. Попов** кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; popov@ssau.ru
- Е. С. Горячкин** кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; goryachkin.es@ssau.ru
- С. А. Мельников** аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; melnikov.sa@ssau.ru
- А. И. Щербань** инженер кафедры теории двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; korneeva.ai@ssau.ru
- Е. Д. Гатауллина** магистр института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; Helena_g99@mail.ru

Приводятся результаты оптимизации рабочего процесса одноступенчатой осевой турбины с целью повышения её КПД. В ходе оптимизации требовалось максимально сохранить конструкцию исходной турбины. Для решения данной задачи разработана схема параметризации лопаток и трактовых обводов турбины с учётом конструкторских и технологических ограничений. Сопловая лопатка турбины имела дефлектор. Для контроля возможности размещения дефлектора разработана специальная программа, отслеживающая пространственное положение сечений лопатки соплового аппарата. Для контроля параметров потока на выходе из турбины по высоте разработана программа пост-обработки. Критериями оптимизации являлись КПД и величина отклонения угла выхода потока из турбины по высоте от исходного. Ограничениями являлись расход рабочего тела и степень понижения полного давления в турбине. Задача решалась в несколько этапов с различными варьируемыми переменными. В результате решения задачи удалось повысить КПД турбины на 0,87%.

Осевая охлаждаемая турбина; внутренний дефлектор; рабочий процесс; оптимизация; параметризация; технологичность

Цитирование: Попов Г.М., Горячкин Е.С., Мельников С.А., Щербань А.И., Гатауллина Е.Д. Газодинамическая оптимизация рабочего процесса одноступенчатой охлаждаемой осевой турбины с дефлектором внутри // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 3. С. 144-153. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-144-153

Введение

Целью работы являлся поиск возможностей повышения КПД одноступенчатой осевой газовой турбины (рис. 1). При этом модернизированный вариант турбины должен интегрироваться в существующую конструкцию двигателя без изменения других узлов. Сопловая лопатка турбины имеет конвективную схему охлаждения с дефлектором внутри. Поверхность дефлектора должна быть сформирована линейными образу-

ющими из-за особенностей технологической оснастки. Конструкционные ограничения на допустимые изменения проточной части, соответствующие задаче модернизации исследуемой турбины, приведены на рис. 1.

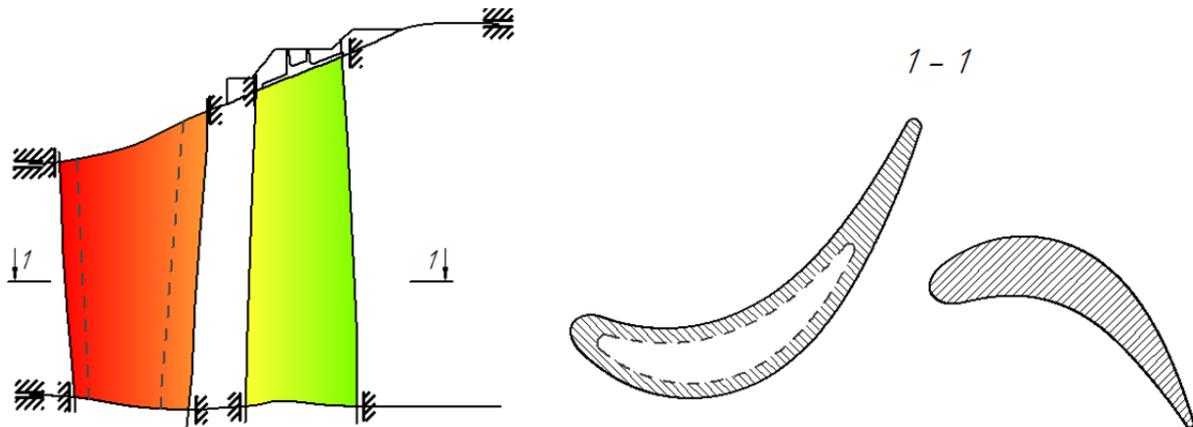


Рис. 1. Исследуемая турбина и заданные конструктивные ограничения на допустимые изменения проточной части

Для того, чтобы не ухудшить работу соседних узлов двигателя, возможные изменения степени понижения полного давления, расхода воздуха, а также распределение угла выхода потока из турбины по высоте в процессе модернизации были ограничены.

Для решения поставленной задачи использовались методы оптимизации, которые позволяют выполнять автоматизированное варьирование геометрическими параметрами турбины с целью нахождения их оптимального сочетания, которое обеспечит максимальный КПД турбины при выполнении всех заданных ограничений на режимные и геометрические параметры турбины.

Описание алгоритма оптимизации

Оптимизация турбины выполнена с использованием программы-оптимизатора IOSO [1; 2]. Схема решения задачи оптимизации приведена на рис. 2.

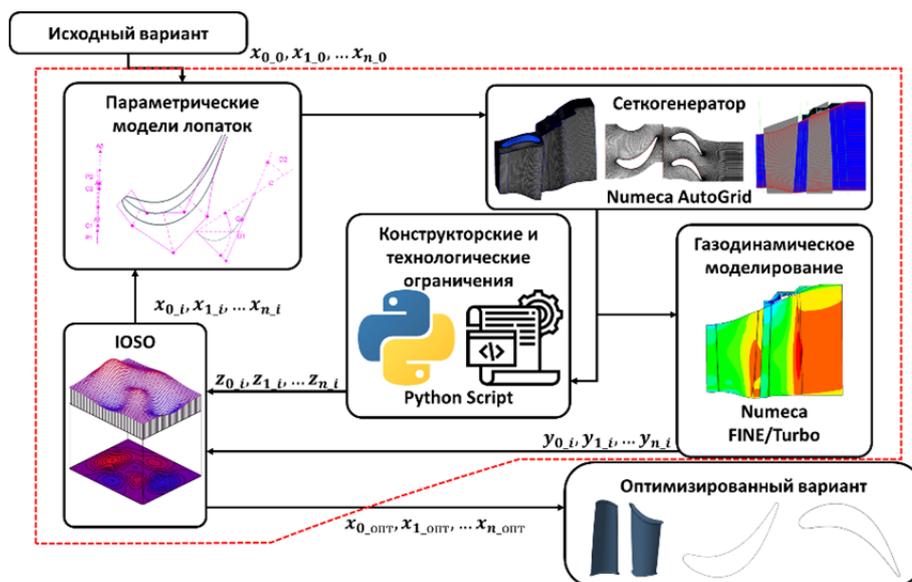


Рис. 2. Алгоритм оптимизации турбины с использованием программы IOSO

Оптимизация турбины – это итеративный процесс, состоящий из множества последовательных шагов, выполняющихся автоматизированно. На каждом i -ом шаге программой IOSO формируется вектор входных переменных $x_{0_i}, x_{1_i}, x_{n_i}$, значения которых загружаются в параметрические модели лопаток и трактовых обводов. Далее строится расчётная сетка и выполняется трёхмерное численное моделирование, в результате которого определяется вектор выходных переменных $y_{0_i}, y_{1_i}, y_{n_i}$, представляющих собой рассчитанные параметры рабочего процесса турбины. Программа учёта конструкторских и технологических ограничений формирует вектор выходных переменных $z_{0_i}, z_{1_i}, z_{n_i}$, характеризующих конструкторские и технологические ограничения. Векторы $y_{0_i}, y_{1_i}, y_{n_i}$ и $z_{0_i}, z_{1_i}, z_{n_i}$ возвращаются в программу IOSO, которая выполняет их обработку на основе оптимизационных алгоритмов и формирует новый вектор входных параметров $x_{0_i}, x_{1_i}, x_{n_i}$. Этот цикл повторяется до достижения сходимости задачи оптимизации, когда критерии перестают улучшаться по мере новых итераций. В качестве критериев задачи оптимизации в работе рассматривался КПД турбины η^* и отличие среднего значения угла выхода потока из турбины от исходного $\Delta\alpha_{\text{вых}}$.

Параметрические модели лопаток и трактовых обводов проточной части

В процессе оптимизации менялись переменные, описывающие форму средней линии, спинки и корытца лопаток по схеме на рис. 3. Для сопловой лопатки число параметрических сечений было 5 или 3 в зависимости от постановки задачи оптимизации. Для рабочей лопатки число параметрических сечений было 3. Также для соловой лопатки менялись выносы сечений в осевом и окружном направлениях.

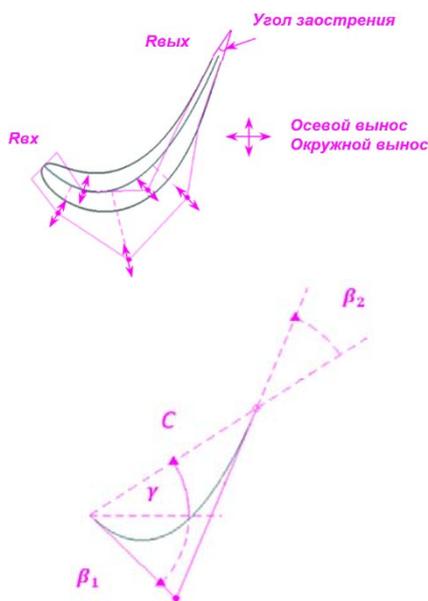


Рис. 3. Схема параметризации лопаток турбины

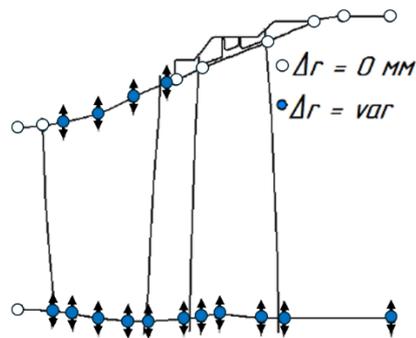


Рис. 4. Схема параметризации трактовых обводов турбины

Кроме того, в процессе оптимизации менялась форма трактовых обводов турбины по схеме, показанной на рис. 4, где маркерами с заливкой обозначены точки трактовых обводов проточной части, радиальные координаты которых менялись в процессе оптимизации, а маркерами без заливки обозначены точки трактовых обводов проточной ча-

сти, координаты которых не менялись в процессе оптимизации. Для подбора необходимой степени понижения полного давления менялось значение статического давления на выходе из турбины.

Описание численной модели

Численная модель рабочего процесса турбины создана в программном комплексе Numeca FINE/Turbo. Моделирование выполнялось в трёхмерной стационарной осесимметричной постановке.

В качестве граничных условий на входе в турбину были заданы радиальные эпюры распределения полного давления, полной температуры и угла потока в окружном направлении (рис. 5). На выходе из турбины задавалось статическое давление на втулочном радиусе. Для передачи данных между доменами соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) использовался интерфейс Full Non Matching Mixing Plane. В качестве модели турбулентности использовалась модель Spalart-Allmaras.

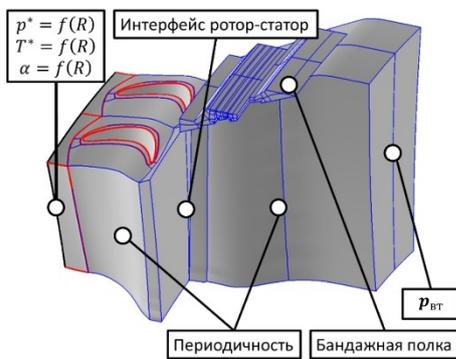


Рис. 5. Граничные условия при численном моделировании турбины

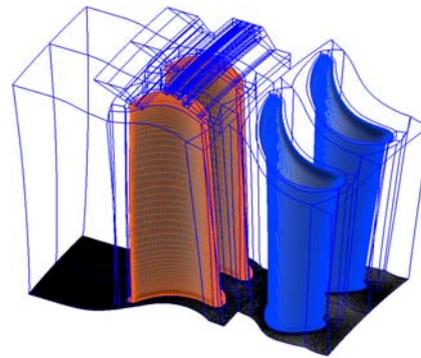


Рис. 6. Сетка конечных объёмов расчётной модели турбины

Настройки сеточной модели (рис. 6) были выбраны с учетом рекомендаций, полученных на основе сопоставления результатов численного моделирования турбин с экспериментальными данными [3 – 6]. В сеточной модели было обеспечено значение безразмерного параметра, характеризующий размер ближайшего к стенке элемента, $y_+ = 1$.

Программы учёта конструкторских и технологических ограничений

В процессе оптимизации часть ограничений выдерживалась автоматически при определении схемы параметризации, например, диаметры на входе в турбину были фиксированы и не менялись. Для выдерживания ограничений, которые было нельзя выдержать автоматически, были разработаны программы, которые контролируют их выполнение.

На рис. 7, а показана схема работы программы для оценки отклонения формы дефлектора от линейной. На спинке и корытце втулочного и периферийного сечений выбираются i контрольных точек на относительном расстоянии \bar{z}_i от входной кромки профиля. Далее с помощью линейного уравнения рассчитывается какое бы положение занимала точка на относительном расстоянии \bar{z}_i от входной кромки профиля в промежуточном сечении на относительной высоте \bar{R} при линейной форме дефлектора и вычисляется расстояние между ним и фактическим положением точки (d_i на рис. 7, а).

Найденные таким образом расстояния для всех i точек суммируются и с помощью этого критерия оценивается отклонение формы дефлектора от линейной.

На рис. 7, б показана схема оценки параметров профилей в контрольных сечениях. Для каждого параметрического сечения оцениваются минимальная и максимальная осевые координаты, а также площадь профиля. Для лопатки СА площадь профилей контролируется таким образом, чтобы обеспечить возможность размещения дефлектора. Для лопатки РК контролируется распределение площадей сечений по высоте, чтобы не допустить ухудшения прочностных параметров.

На рис. 7, в показана схема контроля распределения угла выхода потока из турбины по высоте.

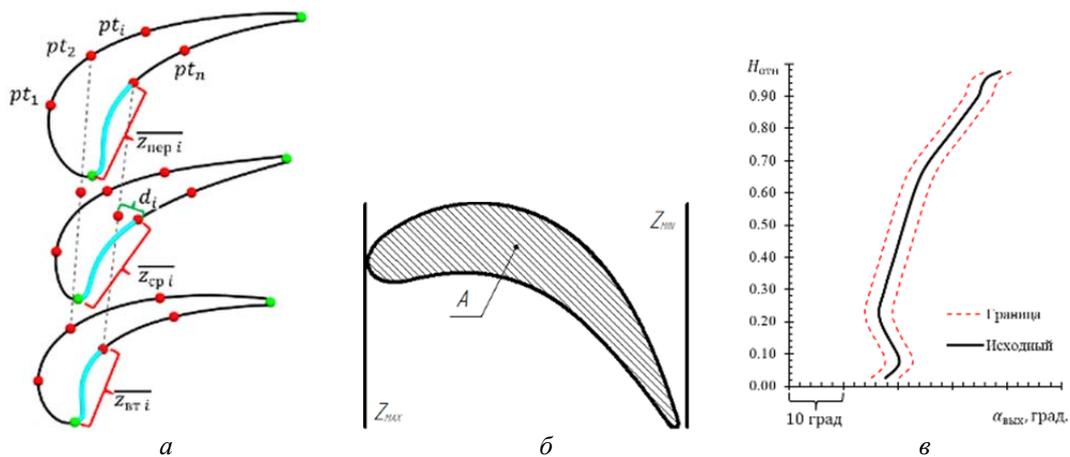


Рис. 7. Ограничения, контролируемые программами в процессе оптимизации:
 а – отклонение формы дефлектора от линейной; б – осевые координаты и площади сечений;
 в – распределение угла выхода потока из турбины по высоте

Оптимизация турбины

Оптимизация турбины проводилась с использованием алгоритма, представленного на рис. 2. Критериями оптимизации являлись КПД η^* и отличие среднего значения угла выхода потока из турбины от исходного $\Delta\alpha_{\text{высх}}$. Варьируемые переменные задачи оптимизации перечислены выше.

Ограничениями при оптимизации являлись:

- изменение значений расхода рабочего тела и степени понижения давления $\pm 1,0\%$ от базовых значений;
- отличие радиальной эпюры угла потока в абсолютном движении на выходе из турбины не более чем на 5 градусов с контролем на 10 радиусах;
- значение параметра, характеризующего отличие формы дефлектора от линейной (рис. 7, а);
- осевые координаты, определяющие перемещение лопаток относительно исходного положения (для контроля изменения конструкции) (рис. 7, б).

Решение задачи оптимизации выполнялось в трёх разных постановках, различающихся степенью варьирования геометрии турбины. Отличия постановок друг от друга приведены в табл. 1.

Таблица 1. Алгоритм поиска требуемого варианта турбины

Этап	Число изменяемых сечений СА	Число изменяемых сечений РК	Учёт варьируемых трактов	Контроль размещения дефлектора СА	Критерии задачи	Кол-во переменных
1	5	3	Нет	Нет	η^* , $\Delta\alpha_{\text{вых}}$	99
2	5	3	Да	Нет	η^* , $\Delta\alpha_{\text{вых}}$	116
Итог: Повышено КПД турбины при сложной геометрии лопатки СА, в которой отсутствовала возможность разместить дефлектор						
3	3	3	Да	Да	η^* , $\Delta\alpha_{\text{вых}}$	94
Итог: Обеспечена возможность размещения дефлектора при большем КПД (рис. 8)						

Результаты решения задач оптимизации представлены в виде фронтов Парето на рис. 8 (параметры оптимизированных вариантов приведены относительно исходного варианта турбины).

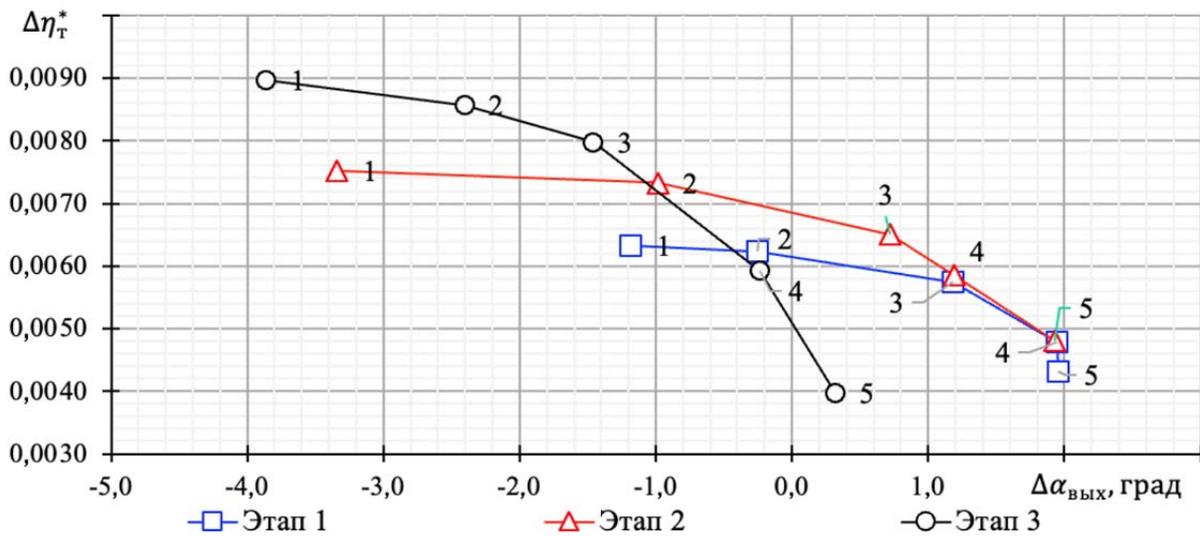


Рис. 8. Результаты решения задач оптимизации турбины

Решение задачи оптимизации этапа 1

На первом этапе задача оптимизации турбины решалась только за счет изменения геометрии лопаток. Форма трактовых обводов оставалась неизменной. Диапазон изменения переменных, определяющих форму лопаток, выбран таким образом, чтобы для СА избежать чрезмерного утонения сечений, что может приводить к ограничению площади проходного сечения дефлектора внутри лопатки. Для лопатки РК контролировалась и поддерживалось примерно постоянным распределение соотношений площадей сечений по высоте для того, чтобы не ухудшить прочностное состояние лопатки. В результате решения задачи оптимизации первого этапа КПД турбины был повышен на 0,63% относительно исходного варианта турбины.

Решение задачи оптимизации этапа 2

На втором этапе постановка задачи оптимизации была аналогична этапу 1, но менялись также форма трактового втулочного обвода СА и РК, а также форма периферийного трактового обвода СА. В качестве начальных вариантов при решении задачи этапа 2 использовались лучшие варианты лопаток СА и РК турбины, найденные при решении задачи этапа 1. В результате решения задачи оптимизации этапа 2 КПД турбины был повышен на 0,75% относительно исходного варианта турбины.

Анализ геометрии лопатки СА, полученной в результате решения задачи оптимизации этапа 2 показал, что ее форма стала криволинейной, что значительно снижает технологичность из-за необходимости использования изогнутого дефлектора и специальной оснастки для его установки в лопатку.

Решение задачи оптимизации этапа 3

Для решения проблемы изогнутого дефлектора при решении задачи оптимизации третьего этапа была разработана специальная программа, которая оценивает отклонение базовой точки профиля среднего сечения от теоретического положения этой точки при линейных образующих лопатки (рис. 7, а). В качестве начальных вариантов при решении задачи оптимизации этапа 3 использованы лучшие найденные при решении задачи этапа 2 варианты лопаток и трактовых обводов турбины, в которых количество параметрических сечений было уменьшено до 3. В результате решения задачи оптимизации этапа 3 КПД турбины был повышен на 0,87% относительно исходного варианта. При этом сохранена возможность использования линейного дефлектора.

Анализ результатов решения задачи оптимизации

В качестве окончательного решения задачи выбрана точка фронта Парето задачи 3 с максимальным значением КПД. Изменение газодинамических параметров турбины после оптимизации приведено в табл. 2.

Таблица 2. Изменение параметров турбины после оптимизации

	Расход рабочего тела	Степень понижения полного давления	КПД	Угол выхода потока из турбины
Изменение	-0,99%	-0,76%	+ 0,090	-3,9 градуса

Сравнение рассчитанных полей числа Маха в относительном движении для исходного и оптимизированного вариантов турбины (рис. 9, 10) показало, что в результате оптимизации был уменьшен отрыв потока во втулочном сечении на входе в СА за счёт поджатия трактовых обводов, а также уменьшена скорость на выходе из СА за счёт раскрытия трактовых обводов. Это привело к снижению потерь в СА. Кроме того, увеличение степени реактивности позволило повысить работу турбины. При этом потери в РК не увеличились. Эти два фактора являются основными причинами повышения КПД турбины в результате оптимизации.

Анализ распределения угла выхода потока из турбины по высоте после оптимизации показал, что угол выхода потока в абсолютном движении на каждом радиусе отличается от исходного не более, чем на 5 градусов. Таким образом, ограничение на данный параметр выполняется.

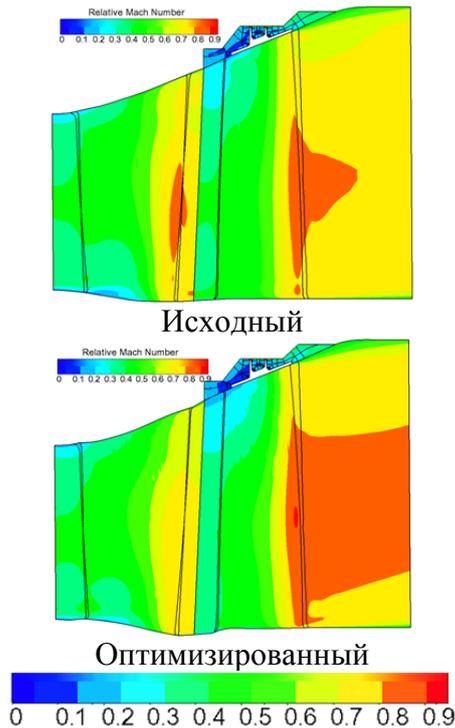


Рис. 9. Числа Маха в относительном движении в меридиональной плоскости

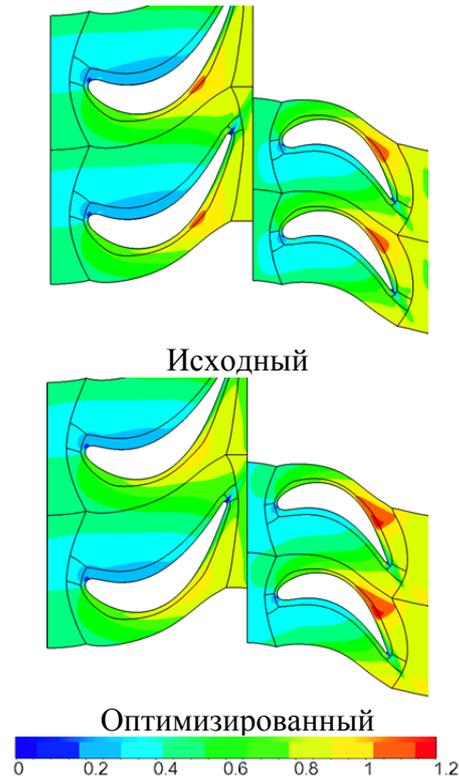


Рис. 10. Числа Маха в относительном движении в среднем сечении

Заключение

В результате оптимизации турбины получен вариант с увеличенным на 0,87% КПД при выполнении требований к распределению угла выхода потока по высоте. При этом выполнены все конструкторские требования и обеспечена возможность размещения линейного дефлектора внутри лопатки СА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10266, <https://rscf.ru/project/23-79-10266/>.

Библиографический список

1. Sigma technology. <http://www.iosotech.com>
2. Egorov I., Kretinin G., Leshchenko I., Kuptzov S. IOSO optimization toolkit - novel software to create better design // Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (September, 4-6, 2002, Atlanta, Georgia). DOI: 10.2514/6.2002-5514
3. Matveev V., Baturin O., Popov G. The optimization of four-stage low pressure turbine with outlet guide vane // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 302, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012037
4. Popov G., Matveev V., Baturin O., Novikova Y., Volkov A. Selection of parameters for blade-to-blade finite-volume mesh for CFD simulation of axial turbines // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 220. DOI: 10.1051/mateconf/201822003003
5. Prabowoputra D.M., Prabowo A.R. Effect of geometry modification on turbine performance: mini-review of Savonius rotor // International Journal of Mechanical

Engineering and Robotics Research. 2022. V. 11, Iss. 10. P. 777-783.
DOI: 10.18178/ijmerr.11.10.777-783

6. Volkov A., Zubanov V., Matveev V., Baturin O., Popov G. Rational settings of a numerical model to simulate the working process of an axial-film-cooled turbine blade // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022. V. 11, Iss. 12. P. 901-907. DOI: 10.18178/ijmerr.11.12.901-907

GAS DYNAMIC OPTIMIZATION OF THE WORK PROCESS OF A SINGLE-STAGE COOLED AXIAL TURBINE WITH AN INSIDE BAFFLE

© 2024

G. M. Popov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Theory; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; popov@ssau.ru

E. S. Goryachkin Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Theory; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; goryachkin.e.s.@ssau.ru

S. A. Melnikov Postgraduate Student of the Department of Aircraft Engine Theory; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; melnikov.sa@ssau.ru

A. I. Shcherban Engineer of the Department of Aircraft Engine Theory; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; korneeva.ai@ssau.ru

E. D. Gataullina Master Student of the Institute of Engine and Power Plant Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; Helena_g99@mail.ru

The article presents the results of optimization of the work process of a single-stage axial turbine in order to increase its efficiency. During optimization, it was necessary to preserve the construction of the original turbine as much as possible. To solve this problem, a parameterization scheme for turbine blades and path contours was developed, taking into account the design and technological limitations. The turbine nozzle blade had an inside baffle. To control the possibility of placing the baffle, a special program was developed that automatically monitors the spatial position of the sections of the blade of the nozzle set. A post-processing program was developed to control the flow parameters at the turbine outlet in height. The efficiency and the vertical deviation of the angle of the outflow from the turbine from the original one were used as optimization criteria. The limitations were the mass flow rate of the working fluid and the total pressure ratio of the turbine. The problem was solved in several stages with different changing variables. As a result of solving the problem, it was possible to increase the turbine efficiency by 0.9%.

Axial turbine; inside baffle; optimization; parameterization

Citation: Popov G.M., Goryachkin E.S., Melnikov S.A., Shcherban A.I., Gataullina E.D. Gas dynamic optimization of the work process of a single-stage cooled axial turbine with an inside baffle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 3. P. 144-153. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-144-153

References

1. Sigma technology. Available at: <http://www.iosotech.com>
2. Egorov I., Kretinin G., Leshchenko I., Kuptzov S. IOSO optimization toolkit - novel software to create better design. *Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (September, 4-6, 2002, Atlanta, Georgia)*. DOI: 10.2514/6.2002-5514

3. Matveev V., Baturin O., Popov G. The optimization of four-stage low pressure turbine with outlet guide vane. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 302, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012037

4. Popov G., Matveev V., Baturin O., Novikova Y., Volkov A. Selection of parameters for blade-to-blade finite-volume mesh for CFD simulation of axial turbines. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 220. DOI: 10.1051/mateconf/201822003003

5. Prabowoputra D.M., Prabowo A.R. Effect of geometry modification on turbine performance: mini-review of Savonius rotor. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2022. V. 11, Iss. 10. P. 777-783. DOI: 10.18178/ijmerr.11.10.777-783

6. Volkov A., Zubanov V., Matveev V., Baturin O., Popov G. Rational settings of a numerical model to simulate the working process of an axial-film-cooled turbine blade. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2022. V. 11, Iss. 12. P. 901-907. DOI: 10.18178/ijmerr.11.12.901-907