

УДК 62-135

doi 10.54708/19926502_2025_29110716

Многокритериальная оптимизация переходного канала с обратным направляющим аппаратом в программном комплексе IOSO

В.В. Еременко^а, А.Е. Михайлов^б, А.Б. Михайлова^в,
М.О. Горюхин^г, Д.Г. Красноперов^д

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологии» (УУНиТ), г. Уфа, Россия

Аннотация. В работе была проведена многокритериальная оптимизация переходного канала с обратным направляющим аппаратом с учетом полей параметров за первой ступенью центробежного компрессора. Разработана методика проведения прямых оптимизационных расчетов в ПО IOSO для переходных каналов. По результатам многокритериальной оптимизации получены Парето-множество решений по коэффициенту восстановления полного давления и неравномерности потока на выходе, из которого выбрана оптимальная точка с максимальным значением коэффициента восстановления полного давления. Произведен CFD-расчет оптимизированного канала с первой ступенью центробежного компрессора, по результатам которого повышение коэффициента восстановления полного давления переходного канала составило 5,5 %.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, переходной канал с обратным направляющим аппаратом, центробежный компрессор, IOSO.

^аv1ad.ereenko@yandex.ru, ^бalexandra11112007@yandex.ru, ^вmikhailov.ugatu@gmail.com, ^гgoryuhin.maksim-o@net.ugatu.su, ^дdaniil.k1999@mail.ru

Введение

Современный уровень развития высокотехнологических объектов, в том числе газотурбинных двигателей, требует современных средств при их разработке для максимально достижимых конкурентоспособных показателей. Стремление обеспечить максимально возможные параметры приводит к необходимости перебора некоторого количества варьируемых параметров.

Применение численного моделирования для CFD-расчетов лопаточных машин и расчетов на прочность элементов конструкции на данный момент является обязательным, но недостаточным условием при проектировании конкурентоспособных двигателей. Необходимо использование современных программ оптимизации, интегрированных в ПО для проведения необходимых расчетов.

Существуют достаточно много различных ПО, которые позволяют автоматизировать процесс выбора параметров разрабатываемой системы и за счет заложенного алгоритма оптимизации определять оптимальное значение выбранного критерия или критериев. В частности, Ansys optiSLang, Ansys DesignXplorer и IOSO [1] позволяют реализовать технологию оптимизации. Отечественное ПО для оптимизации IOSO базируется на новой эволюционной технологии построения поверхности отклика. Поэтому стратегия решения оптимизационных задач в IOSO существенно отличается от известных подходов нелинейного программирования: она обладает более высокой эффективностью и обеспечивает гораздо более широкие возможности [2, 3].

Вычислительная гидродинамика (CFD) стала важным инструментом для проектирования и прогнозирования производительности центробежных компрессоров. Как правило, стационарные CFD-расчеты используются при аэродинамическом проектировании благодаря доступному времени выполнения. Устойчивое CFD моделирование также широко используется для сравнения производительности различных конструкций и оптимизации конструкции. С учетом растущего спроса на повышение эффективности центробежных компрессоров, расширение рабочего диапазона и компактность важно не только улучшить возможности численных инструментов по прогнозированию производительности, но и обеспечить быстрые проектные итерации за приемлемое время.

Известно, что одним из слабых мест в центробежном компрессоре, в том числе и двухступенчатом, является переходной канал. Поэтому интерес для оптимизации представляет переходной канал с обратным направляющим аппаратом (ОНА). Уменьшение гидравлических потерь в нем позволит в некоторой мере повысить удельные характеристики двигателя в целом.

В отечественной и зарубежной литературе можно найти несколько работ, посвященных оптимизации обратного канала. Veress и Van den Braembussche [4] использовали аналитическую процедуру обратного проектирования с заданным распределением параметров для получения трехмерного обратного направляющего аппарата с передней кромкой, расположенной выше U-образного изгиба, а именно на выходе диффузора (Рис. 1). Их результаты, включая также CFD-расчеты, показали значительное улучшение по сравнению с базовым 2D-каналом с точки зрения увеличения коэффициента восстановления полного давления и уменьшения вторичных течений.

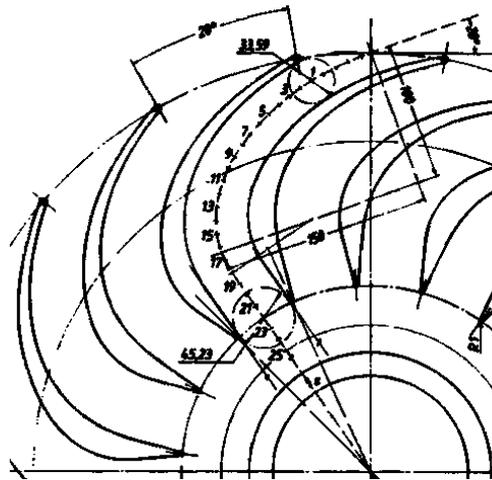


Рисунок 1. Параметризация обратного направляющего аппарата.

В 2020 году Hildebrandt представил полную 3D [5] оптимизацию с помощью CFD-решателя OpenFoam и генетических алгоритмов для минимизации коэффициента потерь давления (Рис. 2). Для того, чтобы проанализировать влияние профиля поля потока на результат оптимизации, были исследованы два оптимизационных расчета с различными профилями потока, что привело к различному углу передней кромки, различному углу поворота лопатки обратного канала и, следовательно, к различному распределению статического давления. В своем подробном анализе Hildebrandt получил результаты в снижении потерь полного давления.

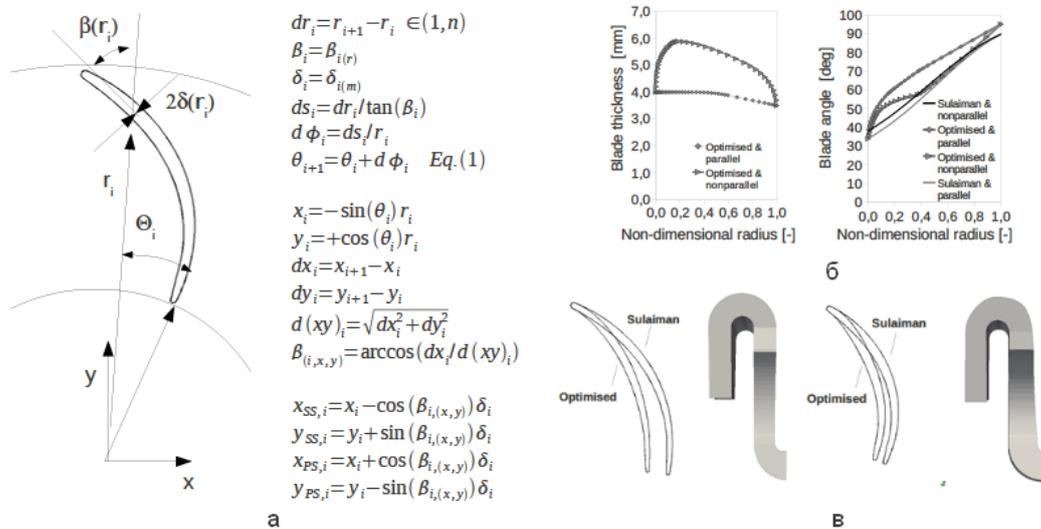


Рисунок 2. (а) – параметризация ОНА; (б) – изменения параметров в ходе оптимизации; (в) – изменения геометрии в ходе оптимизации.

В 2013 году Nishida и др. [6] оптимизировали и испытали двумерный обратный канал с помощью первоначального планирования экспериментов (Design of Experiments – DOE) с выборкой из латинского гиперкуба и последующей многоцелевой оптимизацией генетическими алгоритмами на основе поверхностей отклика Крингинга. В своей работе авторы параметризовали геометрию, варьируя длину, ширину, углы и количество лопаток обратного направляющего аппарата, сохраняя при этом фиксированными U-образный изгиб и положение передней кромки (Рис. 3). Результаты эксплуатационных испытаний показали, что оптимизированный обратный канал имеет коэффициент восстановления полного давления выше на 3,2 % и политропный КПД рабочего колеса выше на 1,0%, чем в исходном канале.

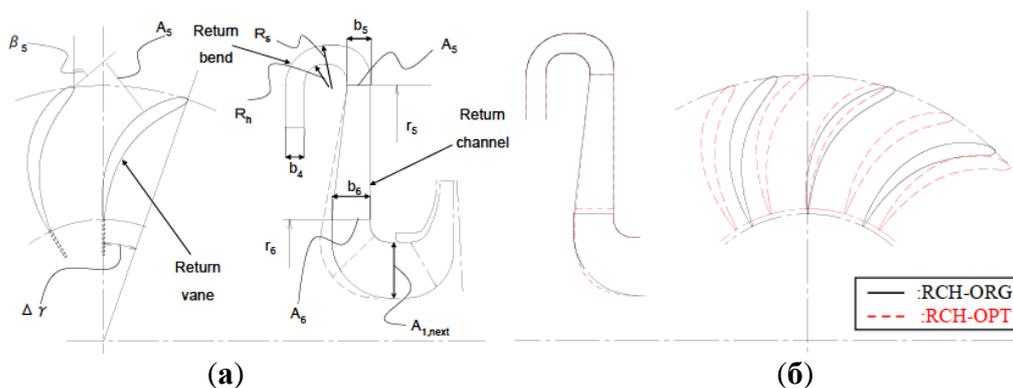


Рисунок 3. (а) – параметризация ОНА; (б) – исходный и оптимизированный варианты объекта.

В работе [7] представлена оптимизация ОНА с учетом влияния утечек воздуха. В качестве оптимизируемых параметров было выбрано распределение угла наклона лопаток с помощью 9 полюсов Безье, в общей сложности 18 параметров, с целью минимизации коэффициента потери давления в расчетной точке (Рис. 4). Была построена поверхность отклика на основе DOE, а окончательная конструкция была получена с помощью виртуальной оптимизации генетического алгоритма. Оптимальная геометрия была валидирована с помощью CFD-расчета, и результаты расчета показали значительное увеличение коэффициента восстановления полного давления во всем рабочем диапазоне.

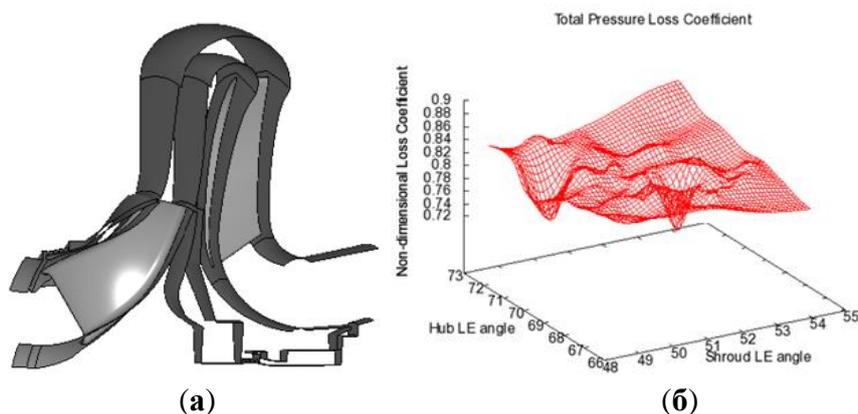


Рисунок 4. (а) – исходная модель переходного канала; (б) – Парето-множество, полученное в результате оптимизации.

Отталкиваясь от упомянутых работ, в настоящем исследовании рассматривается оптимизация переходного канала с ОНА между двумя ступенями центробежного компрессора в программном комплексе IOSO.

Численное моделирование

Объектом оптимизации является переходной канал с обратным направляющим каналом. Для проведения адекватной оптимизации необходимо учесть поля скоростей, давления и температуры за лопаточным диффузором. Для того, чтобы корректно смоделировать поле течения внутри ступени без увеличения пользовательского и/или вычислительного времени, в данной работе использовался двухэтапный подход к моделированию. Сначала была смоделирована базовая ступень ЦБК, полная расчетная модель которой представлена на Рис. 5, (а).

На входе в расчетную модель задавалось полное давление и температура, соответствующие стандартным атмосферным условиям, а на выходе – статическое давление. Граничное условие статор-ротор выбрано Mixing-Plane (Constant Total Pressure), в то же время граничное условие статор-статор (между ЛД и переходным каналом) выбрано Frozen Rotor с целью получения неосредненных параметров в зоне интерфейса. Модель турбулентности выбрана BSL Explicit Algebraic Reynolds Stress Models – EARSM [8–11]. Стоит отметить, что для проведения оптимизационного расчета предполагается двухсекторная расчетная область переходного канала с ОНА для обеспечения полного межлопаточного канала.

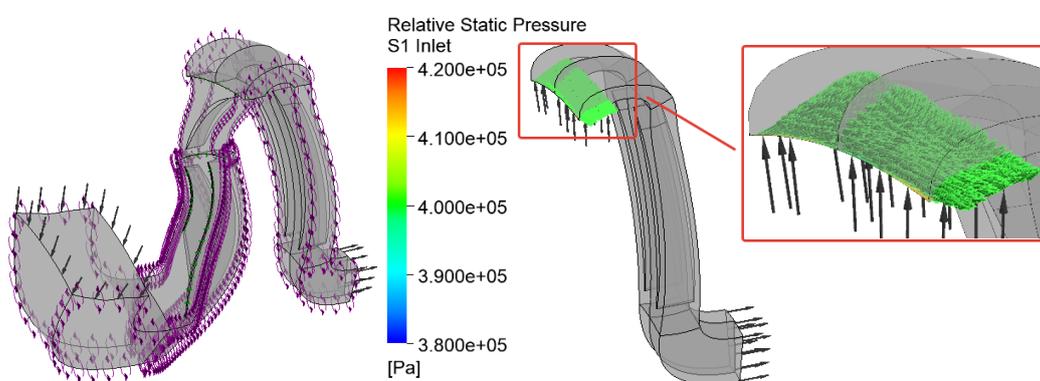


Рисунок 5. Расчетные модели:

(а) – расчетная модель переходного канала с первой ступенью ЦБК; (б) – расчетная модель переходного канала с импортированными полями параметров.

В качестве граничных условий на входе задавались импортированные поля статического давления, полной температуры и проекции абсолютной скорости на координатные оси в декартовой системе координат, а также поля турбулентной кинетической энергии и турбулентной вихревой диссипации. На выходе задавался физический расход воздуха (3,83 кг/с), который определен исходя из проектных параметров компрессора.

Однако при импорте поля проекций скорости на оси на периферии возникает обратное течение, в результате которого векторы направлены против граничного условия входа. Это некорректно с точки зрения задания входного граничного условия (так как в методе конечных объемов невозможно направление параметра касательно поверхности элементов), поэтому на периферии на расстоянии 0,0005 м значения скоростей были искусственно занулены. Теоретически это может привести к заведомо худшим результатам, чем при моделировании полной задачи с первой ступенью центробежного компрессора.

Для оценки чувствительности численного решения к сеточной модели были проведены расчеты при различных сеточных моделях. При этом оценивался оптимизируемый параметр – коэффициент восстановления полного давления, а также время расчета.

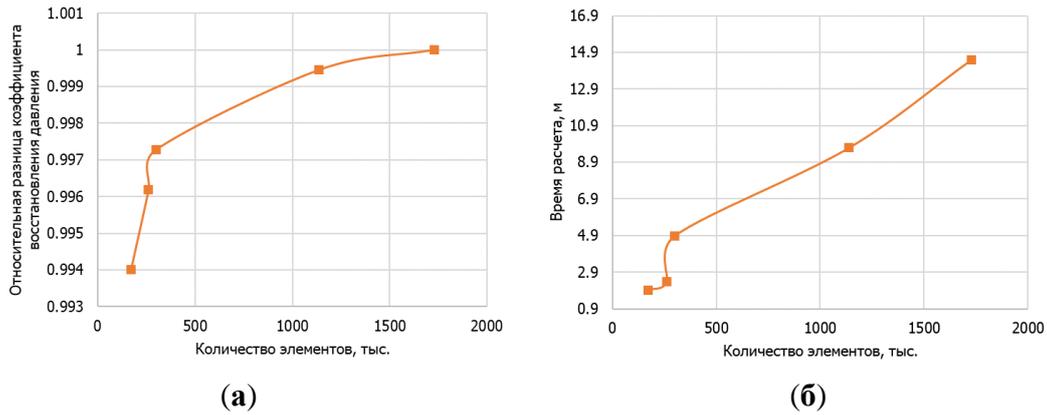


Рисунок 6. Оценка чувствительности сеточной модели переходного канала с ОНА: (а) – относительная разница коэффициента восстановления давления в зависимости от размера сеточной модели; (б) – время расчета в зависимости от размера сеточной модели.

По Рис. 6 видно, что сеточная модель, состоящая из 266050 элементов, является компромиссным вариантом между временем расчета и относительной разницей по значению коэффициента восстановления полного давления.

С целью автоматической остановки расчета были прописаны пользовательские функции по стандартной девиации значений, относительной разнице расходов на входе и выходе и значению коэффициента восстановления давления, а также для ускорения расчета было прописано изменение автоматического шага по времени.

Параметризация объекта оптимизации

Параметризованная модель переходного канала с ОНА представлена на Рис. 7. Входные, междоменные и выходные границы в процессе оптимизации не изменялись.

Втулочный и периферийный обводы основаны кривыми базисных сплайнов, которые заданы некоторым количеством контрольных точек. Также в качестве варьируемого параметра выбраны толщина профиля, лопаточный угол на входе в ОНА и положение входной и выходной кромок ОНА. Подобранные диапазоны варьирования параметров указаны далее.

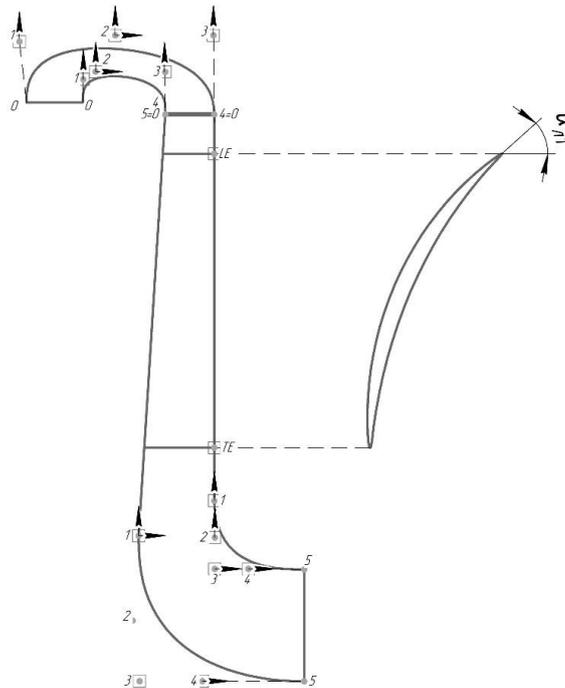


Рисунок 7. Параметризованная модель для оптимизации.

После того, как проект был подгружен, были выбраны контрольные точки сплайнов, входной лопаточный угол, положения входной и выходной кромок ОНА с учетом подобранных диапазонов варьирования (Табл. 1).

Таблица 1. Варьируемые параметры.

Параметры	Значение	Параметры	Значение
Периферия точка 1х, м	0,180 ... 0,198	Втулка 1х, м	0,18 ... 0,188
Периферия точка 2х, м	0,075 ... 0,1	Втулка 2х, м	0,076 ... 0,09
Периферия точка 2у, м	0,19 ... 0,198	Втулка 2у, м	0,18 ... 0,188
Периферия точка 3у, м	0,186 ... 0,198	Втулка 3у, м	0,183 ... 0,189
Периферия точка 1у, м	0,075 ... 0,08	Втулка 1х, м	0,088 ... 0,095
Периферия точка 2у, м	0,07 ... 0,074	Втулка 1у, м	0,065 ... 0,075
Периферия точка 3у, м	0,109 ... 0,115	Положение входной кромки	0,038 ... 0,12
Периферия точка 4х, м	0,12 ... 0,125	Положение выходной кромки	0,7 ... 0,75
		Лопаточный угол, град.	15 ... 70

При этом в процессе выборки диапазона варьирования контрольных точек сплайнов одним из условий было отсутствие самопересечений и пересечений втулочного и периферийного обводов, что значительно уменьшает количество неадекватных с точки зрения геометрии вариантов.

Метод оптимизации

Для многокритериальной оптимизации использовался пакет IOSO. Основные преимущества алгоритма IOSO перед известными подходами к решению многокритериальных задач заключаются в возможности решения практических задач для случая невыпуклых, недифференцируемых и стохастических целевых функций и ограничений; в отсутствии необходимости значительной адаптации математической модели исследуемого объекта; в возможности получения множества Парето-оптимальных решений при сравнительно небольшом количестве прямых обращений к исследуемой математической модели; в достаточно высокой вероятности определения глобального экстремума в многоэкстремальных задачах. Эти преимущества являются основой для широкого использования предлагаемого метода для решения практических задач [12–13].

При проведении расчетов многокритериальной оптимизации соблюдается несколько шагов (Рис. 8):



Рисунок 8. Схема оптимизации.

В качестве критериев оптимизации выбраны коэффициент восстановления полного давления и неравномерность потока на выходе, оцениваемая как отношение максимальной скорости к среднemasсовой скорости на выходе из канала (Табл. 2).

Таблица 2. Критерии оптимизации.

Параметры	Значение
Коэффициент восстановления полного давления	MAX
Неравномерность потока на выходе из ОНА	MIN

Выбор критериев оптимизации основан на требованиях, предъявляемых к переходным каналам.

Результаты численного моделирования

Результатом оптимизации является Парето-множество решений (множество неулучшаемых (по критериям) решений, каждому из которых соответствует свой набор оптимизационных (проектных) параметров) по коэффициенту восстановления полного давления и неравномерности потока на выходе из ОНА, показанное на Рис. 9. В данной постановке задачи считается, что оптимальная модель обладает максимальным значением коэффициента восстановления полного давления (отмечена желтой точкой).

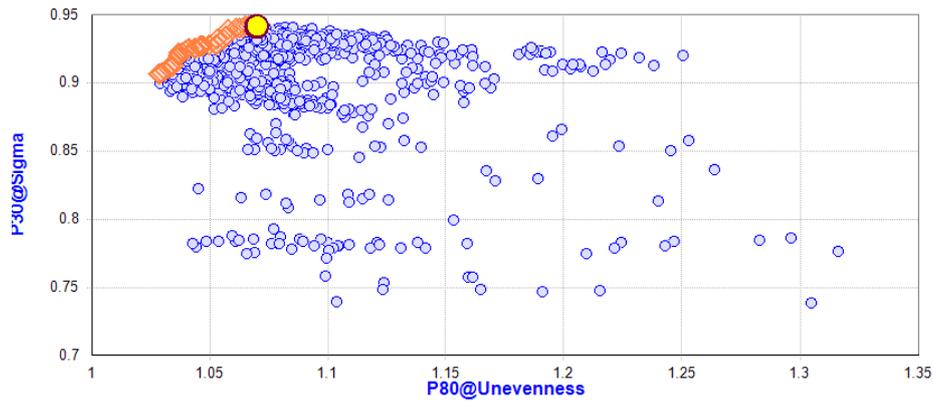


Рисунок 9. Парето-множество коэффициента восстановления полного давления и неравномерности потока.

На Рис. 10 представлены результаты оптимизации в виде зависимости коэффициента восстановления полного давления от некоторых варьируемых параметров. Наблюдается характерное скопление представленных варьируемых параметров в областях, в которых обеспечивается оптимальное значение коэффициента восстановления полного давления. Однако часть варьируемых параметров (в частности, ряд контрольных точек сплайнов) в процессе оптимизации изменялись незначительно.

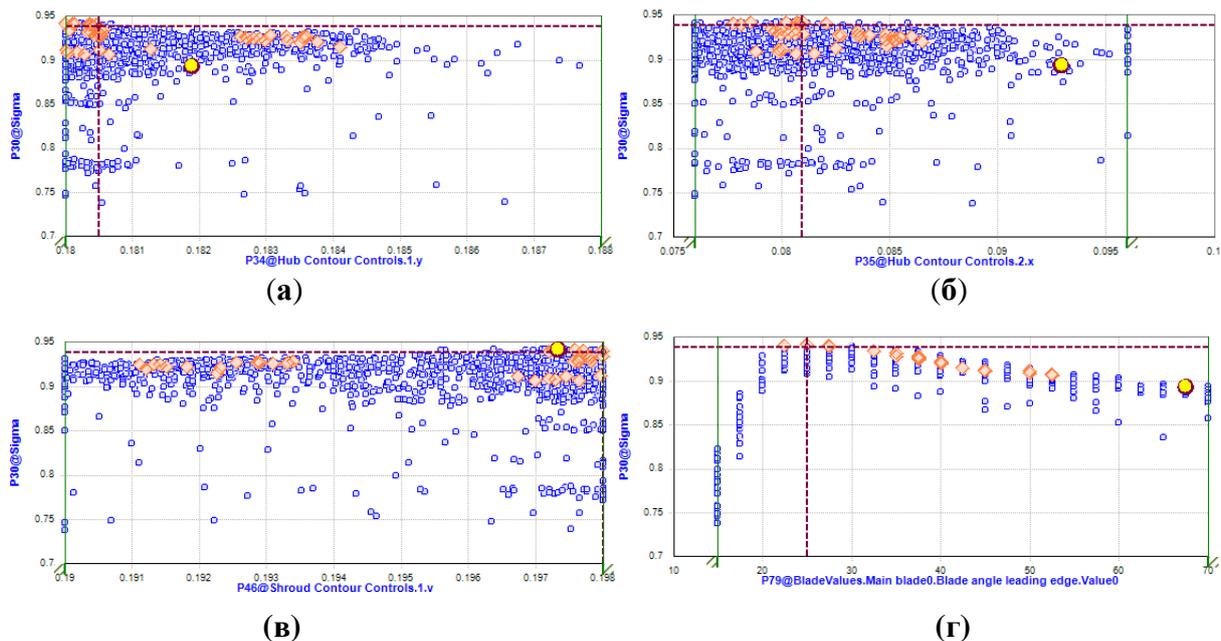


Рисунок 10. Корреляции коэффициента восстановления полного давления и следующих параметров:

- (а) – координаты у контрольной точки на периферии; (б) – координаты х контрольной точки; (в) – координаты у контрольной точки на втулке; (г) – входного лопаточного угла.

Выбранная оптимальная модель в сравнении с исходной моделью переходного канала с ОНА представлена на рисунке 11. Стоит отметить, что в процессе оптимизации значительно изменились сечение переходного канала, положения входной и выходной кромок и входной лопаточный угол ОНА. При этом в области втулки и периферии обратного направляющего аппарата положения контрольных точек сплайнов изменились незначительно.

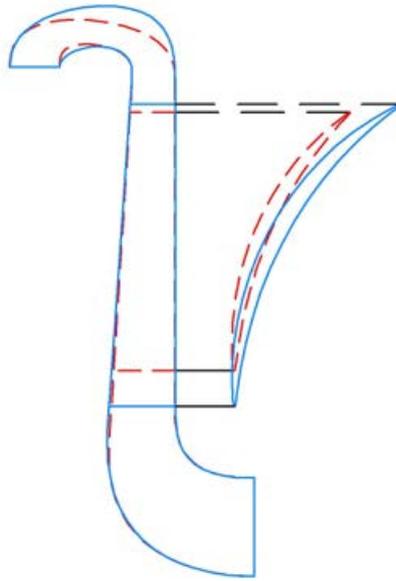


Рисунок 11. Меридиональные обводы исходной (штриховая линия) и оптимизированной (сплошная линия) модели переходного канала с ОНА.

С целью верификации полученной модели были проведены CFD-расчеты в одиночной постановке и в составе первой ступени центробежного компрессора. На рисунке 12 показано распределение статической энтропии исходной модели, оптимизированной модели и оптимизированной модели в составе первой ступени. По рисункам видно, что в оптимизированной модели существенно уменьшилась отрывная зона со спинки лопатки, что привело к увеличению коэффициента восстановления полного давления.

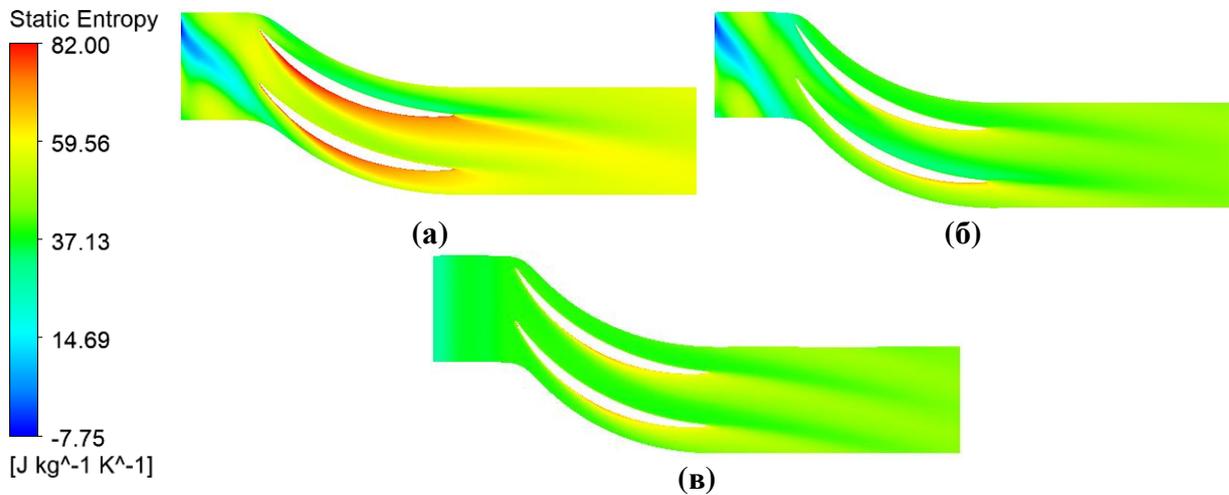


Рисунок 12. Распределение статической энтропии: (а) – исходная модель; (б) – оптимизированная модель; (в) – оптимизированная модель в составе первой ступени.

По результатам расчета получены параметры исходной и оптимизированной моделей (Табл. 3).

Таблица 3. Газодинамические параметры первой ступени ЦБК в составе переходного канала с ОНА.

Параметр	Исходная модель	Оптимизированная модель	Оптимизированная модель в составе первой ступени ЦБК
Коэффициент восстановления полного давления	0,91	0,94	0,96
Неравномерность потока на выходе	1,06	1,1	1,09

Интересно заметить, что коэффициент восстановления полного давления в оптимизированной модели в одиночной постановке меньше, чем в составе первой ступени. Как уже говорилось, это связано с допущением, которое было принято на стадии постановки CFD задачи.

Заключение

В данном исследовании проведена многокритериальная оптимизация переходного канала между ступенями центробежного компрессора. Варьируемыми параметрами были контрольные точки сплайна, входной угол в ОНА и положение входной и выходной кромок ОНА с целью увеличения коэффициента восстановления полного давления и минимизации неравномерности потока на выходе из ОНА. При этом в процессе выборки диапазона варьирования контрольных точек сплайнов одним из условий было отсутствие самопересечений и пересечений втулочного и периферийного обводов, что значительно уменьшает количество неадекватных с точки зрения геометрии вариантов.

Результатом оптимизации стало Парето-множество решений по коэффициенту восстановления и неравномерности потока. Оптимальная точка выбрана с максимальным значением коэффициента восстановления полного давления, которое на 5,5 % больше, чем в исходной модели. В модернизированной модели существенно изменились проходные сечения переходного канала, положения входной и выходной кромок ОНА и входной угол в него. За счет этого в оптимизированной модели существенно уменьшилась отрывная зона со спинки лопатки, что позволило увеличить коэффициент восстановления полного давления.

Полученные результаты подтвердили целесообразность применения многокритериальной оптимизации для переходных каналов с учетом импортированных полей параметров. Дальнейшая работа будет заключаться в последующей оптимизации переходного канала с учетом исключения нечувствительных параметров.

Литература:

1. Егоров И.Н. и др. Методы непрямой статистической оптимизации на основе самоорганизации и их использование в оптимизационных задачах авиационных ГТД. -ВИНИТИ (2622-B89), 1988 г. [Egorov I.N. et al. Methods of indirect statistical optimization based on self-organization and their use in optimization problems of aviation GTEs. -VINITI (2622-B89), 1988 (in Russian).]
2. Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A., Kuptzov S.V. IOSO Optimization Toolkit — Novel Software to Create Better Design // AIAA paper AIAA-2002-5514, 9th AIAA/ISSMO Symposium and Exhibit on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, GA, 4–6 September 2002.
3. Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A., Kuptzov S.V. Multi-Objective Robust Optimization Using IOSO Technology. Part I: Main Features // EUROGEN 2003, Barcelona, Spain, 15–17 September 2003.
4. Veress, A., Van den Braembussche, R., 2004. “Inverse Design and Optimization of a Return Channel for a Multistage Centrifugal Compressor”. Journal of Fluids Engineering, September 2004, Vol. 126, 799-806.

5. Hildebrandt A., 2012. "Numerical Analysis of Overall Performance and Flow Phenomena of an Automatically Optimized Three-Dimensional Return Channel System for Multistage Centrifugal Compression Systems". In ASME Turbo Expo 2012. ASME Paper GT2012-68559.
6. Nishida, Y., Kobayashi, H., Nishida, H., Sugimura, K., 2013. "Performance Improvement of a Return Channel in a Multistage Centrifugal Compressor Using Multiobjective Optimization". Journal of Turbomachinery, May 2013, Vol. 135, 031026.
7. De Bellis F., Guidotti E., Rubino D. T. Centrifugal compressors return channel optimization by means of advanced 3D CFD //Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – American Society of Mechanical Engineers, 2015. – Paper No. V02CT45A024.
8. F. R. Menter, A. V. Garbaruk and Y. Egorov, Progress in Flight Physics 3 (2012) 89-104.
9. ANSYS Inc., 2018, "ANSYS CFX-Solver Theory Guide (v. 19.1)," no. April. Canonsburg, PA, p. 370.
10. Morsbach, C., 2016, Reynolds Stress Modelling for Turbomachinery Flow Applications, Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, p. 177
11. Еременко В. В. и др. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности при численном моделировании экспериментальной ступени центробежного компрессора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22. – №. 4. – С. 99-111. [Eremenko V. V. et al. Comparative analysis of turbulence model influence in numerical simulation of an experimental radial compressor stage // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 22. – No. 4. – pp. 99-111 (in Russian).]
12. Егоров И.Н., Кретинин Г.В., Федечкин К.С. Оптимизационные исследования ступени осевого компрессора. Полет №12, 2007 г. (Egorov I.N., Kretinin G.V., Fedechkin K.S. Optimization studies of the axial compressor stage. Flight No. 12, 2007 (in Russian).]
13. Веб-ресурс компании «IOSO Technology Center» – <http://www.iosotech.com>.

Об авторах:

ЕРЕМЕНКО Владислав Викторович, инж. ПИШ «Моторы будущего». Диплом инженера по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УУНиТ, 2024). Иссл. в обл. малоразмерных ГТД.

МИХАЙЛОВ Алексей Евгеньевич, с.н.с. ПИШ «Моторы будущего». Диплом инженера по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2010). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2015). Иссл. в обл. рабочих процессов ГТД на установившихся и неуставившихся режимах работы.

МИХАЙЛОВА Александра Борисовна, с.н.с. ПИШ «Моторы будущего». Диплом инженера по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. процессов в компрессорах с использованием имитационного моделирования.

ГОРЮХИН Максим Олегович, инж. ПИШ «Моторы будущего». Диплом инженера по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УУНиТ, 2023). Иссл. в обл. малоразмерных ГТД.

КРАСНОПЕРОВ Даниил Германович, инж. ПИШ «Моторы будущего». Диплом инженера по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УУНиТ, 2023). Иссл. в обл. малоразмерных ГТД.

Metadata:

Title: Multi-Criteria Optimization of Return Channels of Centrifugal Compressor Stages Using IOSO.

Author 1: Vladislav Viktorovich Eremenko, engineer at the Advanced Engineering School "Motors of the Future". Engineer's diploma in aircraft engines and power plants (UUST, 2024). Research in the field of small-size gas turbine engines; vlad.eremenko@yandex.ru.

Author 2: Alexey Evgenyevich Mikhailov, Senior Researcher at the Advanced Engineering School "Motors of the Future". Engineer's diploma in aircraft engines and power plants (USATU, 2010).

Cand. Sci. in thermal, electric rocket engines and power plants (USATU, 2015). Research in the field of working processes of gas turbine engines in steady and unsteady operating modes; ²alexandra11112007@yandex.ru.

Author 3: Alexandra Borisovna Mikhailova, Senior Researcher at the Advanced Engineering School "Motors of the Future". Engineer's diploma in aircraft engines and power plants (USATU, 2008). Candidate of Technical Sciences in thermal, electric rocket engines and power plants (USATU, 2011). Research in the field of processes in compressors using simulation modeling; ³mikhai-lov.ugatu@gmail.com.

Author 4: Maxim Olegovich Goryukhin, engineer at the Advanced Engineering School "Motors of the Future". Engineer's diploma in aircraft engines and power plants (UUST, 2023). Research in the field of small-size gas turbine engines; goryuhin.maksim-o@net.ugatu.su.

Author 5: Daniil Germanovich Krasnoperov, engineer at the Advanced Engineering School "Motors of the Future". Engineer's diploma in aircraft engines and power plants (UUST, 2023). Research in the field of small-size gas turbine engines; daniil.k1999@mail.ru.

Abstract: In this work multi-criteria optimization of the return channel with a return channel blade was carried out taking into account the parameter fields behind the first stage of a centrifugal compressor. The methodology of direct optimization calculations in IOSO software for return channels has been developed. According to the results of multi-criteria optimization, a Pareto-multiplicity of solutions for the pressure recovery ratio and flow irregularity at the outlet has been obtained, from which the optimum point with the maximum value of pressure recovery ratio has been selected. CFD calculation of the optimized return channel with the first stage of a centrifugal compressor was performed, according to the results of which the increase in the pressure recovery ratio of the return channel was 5.5 %.

Keywords: optimization, return channel with return channel blades, centrifugal compressor, IOSO.