

УДК 621.165

В. П. СУББОТОВИЧ, А. Ю. ЮДИН, С. А. ТЕМЧЕНКО

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАТНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛОВ

Рассмотрены результаты проектирования кольцевого диффузорного канала на основе новых методов решения прямой и обратной аэродинамических задач, специально разработанных для оптимального проектирования. В этих методах аэродинамические задачи представлены ограниченным множеством не связанных между собой задач нелинейного программирования, которые можно решать в любой последовательности или параллельно. Задача оптимального проектирования – задача нелинейной невыпуклой оптимизации при наличии ограничений на геометрические характеристики диффузора. Показано, что спроектированный диффузор с криволинейными образующими имеет низкий коэффициент полных потерь благодаря рациональному сочетанию локальных степени расширения и угла раскрытия.

Ключевые слова: турбомашина, осесимметричное течение, кольцевой диффузор, прямая и обратная аэродинамические задачи.

Введение

Для газовых турбин особо остро стоит проблема повышенных потерь в кольцевых переходных и выходных диффузорных каналах, к которым предъявляются жесткие требования по массовым, вибрационным и габаритным характеристикам. В современных транспортных газотурбинных двигателях для уменьшения их габаритных размеров приходится идти на значительное повышение скорости выхода потока за последней ступенью турбины, что влечет за собой увеличение потерь с выходной скоростью и резкое снижение КПД всего ГТД. Потери могут быть существенно снижены, если использовать диффузорный выходной патрубок с высоким коэффициентом восстановления давления.

Аэродинамические задачи подразделяются на прямые и обратные. Обратная задача – задача, у которой все граничные условия заданы аэродинамическими, заключается в определении неизвестной геометрии канала. При проектировании кольцевого диффузорного канала использовались новые методы решения прямой и обратной задач. Эти методы разработаны авторами на единой методологической основе, что позволило с их помощью одинаково успешно решать задачи оптимального проектирования решеток профилей, кольцевых решеток лопаток турбомашин и кольцевых диффузоров. Методы обеспечивают выполнение требований, вытекающих из особенностей организации вычислительного процесса при решении задач

оптимального проектирования, а именно: проводить параллельные вычислительные процессы, исключить итерационные процессы, которые не сходятся, не хранить существенные объемы информации [1-5].

1. Постановка задачи исследования

Многолетние исследования простейших конических и кольцевых диффузоров с прямолинейной осью показали, что безотрывное течение рабочего тела в указанных устройствах возможно только при определенных сочетаниях угла раскрытия проточной части α и степени расширения канала n [6].

Связь между предельными значениями этих геометрических параметров иллюстрирует зависимость, приведенная на рис. 1, которая делит плоскость $(\alpha-n)$ на две части.

В левой половине плоскости $(\alpha-n)$ располагаются все геометрические параметры рассматриваемых диффузоров, обеспечивающие безотрывное течение при любом их сочетании. В правой части плоскости $(\alpha-n)$ от кривой, изображенной на рис. 1, при любом сочетании величины α и n в диффузорах реализуется течение с отрывом потока от его стенок. При этом течение рабочего тела становится нестационарным с большими амплитудами пульсаций давления, а коэффициент восстановления в диффузорах перестает расти с увеличением степени расширения n и имеет явную тенденцию к снижению. Внешним проявлением возникновения

отрыва потока от обтекаемых поверхностей является повышенная вибрация и ощутимое увеличение акустического излучения.

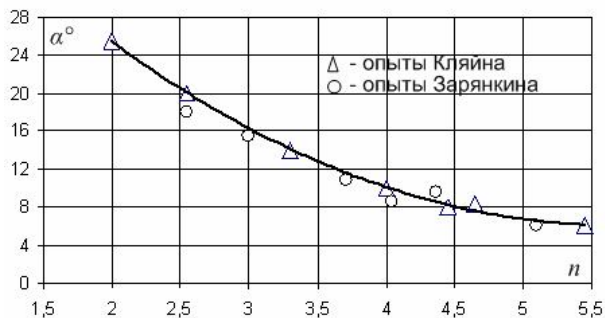


Рис. 1. Предельная линия геометрических параметров безотрывных конических диффузоров

Соответственно, для практических целей необходимо использовать диффузоры, геометрические параметры которых (α – n) обеспечивают безотрывный режим течения. Однако при больших углах раскрытия проточной части безотрывное течение реализуется при малых степенях расширения n и эффект от установки диффузоров оказывается низким. При малых значениях угла α и больших степенях раскрытия n эффективность диффузоров резко увеличивается, но в этом случае их использование во многих случаях ограничивается тем, что при малых значениях углов α большие степени расширения достигаются за счет резкого увеличения осевых размеров.

Для определения границ канала используем обратную аэродинамическую задачу, граничными условиями которой выступают газодинамические характеристики течения в ядре потока.

В процессе оптимального проектирования конкретного канала полагаются неизменными:

- 1) осевой и радиальный габариты канала;
- 2) степень расширения диффузора;
- 3) массовый расход рабочего тела;
- 4) параметры рабочего тела в сечении перед каналом, а именно: распределения по радиусу полного давления, полного удельного объема и угла закрутки потока или проекции на окружное направление вектора скорости;
- 5) шесть или менее граничных условий для функции, задающей геометрию средней линии тока канала, а именно: координата линии тока, величины полных первой и второй производных в осевом направлении на средних радиусах во входном и выходном сечениях диффузора;
- 6) шесть или менее граничных условий для скорости потока, а именно: величина скорости, полные первая и вторая производные скорости в

осевом направлении на средних радиусах во входном и выходном сечениях диффузора.

Целевая функция задачи оптимизации – нелинейная невыпуклая функция – коэффициент полных потерь диффузора. Для вычисления коэффициента внутренних потерь используется методика [7], в соответствии с которой выполняется оценка этих потерь на основе анализа изменения величины локального эквивалентного угла расширения $\theta = 2 \cdot \arctg\left(\frac{1}{U} \frac{dF}{dL}\right)$, где U – величина смоченного периметра сечения канала, нормального к средней линии канала, а F – площадь такого сечения канала; L – длина средней линии канала.

В качестве независимых переменных задачи оптимизации выбраны коэффициенты двух полиномов, которые описывают геометрию какой-либо одной из линий тока и распределение скорости потока вдоль этой линии тока.

2. Описание алгоритма оптимизации

Алгоритм оптимизации кольцевого диффузора при ограничениях на степень расширения и габаритные радиальные и осевые размеры состоит из следующих последовательных шагов:

1. *Исходный диффузорный канал* – задается геометрия диффузорного канала-прототипа, выбираются расчетные сечения, которые с достаточной плотностью покрывают весь канал [3-5];
2. *Решение прямой задачи* – вычисляется поле параметров потока в канале-прототипе;
3. *Параметризирование линии тока и распределения скорости вдоль нее* – выбор степени полиномов и определение их коэффициентов для описания выбранной, например, средней линии тока и распределения скорости потока вдоль нее;
4. *Определение потерь в исходном диффузорном канале* – расчет коэффициента внутренних потерь по методике [7] и коэффициента потерь с выходной скоростью;
5. *Метод оптимизации функции многих переменных* – изменяется геометрия выбранной линии тока и распределение скорости вдоль нее в соответствии с алгоритмом метода решения задач нелинейной невыпуклой оптимизации [8];
6. *Решение обратной задачи* – определение геометрии втулки и обечайки нового промежуточного варианта кольцевого канала;
7. *Определение потерь в диффузорном канале* – определение коэффициента полных потерь в полученном промежуточном варианте канала;
8. *Оценка допустимости решения* – проверка выполнения системы ограничений: оценка вели-

чины угла θ в выходном сечении диффузора для исключения отрывного течения, обеспечение заданных степени расширения и радиальных габаритов, в результате которой при необходимости формируется присоединенная целевая функция;

9. *Функция цели* – выполняется оценка достижения величины критерия окончания процесса оптимального поиска и, если поиск не окончен, тогда возвращаемся к шагу 5.

3. Результаты оптимального проектирования кольцевого диффузора

В качестве диффузора-прототипа выбран кольцевой диффузор с прямолинейными обводами, степенью расширения $n=2$, осевым габаритом $l=0,5$ м ($\alpha=35,7^\circ$). Осевой габарит диффузора с прямолинейными обводами и такими же радиальными габаритами, который соответствует предельной линии рис. 1 при $n=2$, составляет $l=0,65$ м ($\alpha \approx 25^\circ$). На рис. 2 показано изменение локального эквивалентного угла расширения θ вдоль длины канала для четырех диффузоров с $n=2$.

Для трех каналов с прямолинейными обводами угол θ слабо увеличивается вдоль оси. У оптимального диффузора этот угол сначала уменьшается, что стабилизирует пограничный слой, а потом растет, доводя пограничный слой до предотрывного состояния ($\bar{l}=0,25$, $n=1,25$). Далее такая последовательность в изменении угла θ повторяется дважды: пограничный слой приводится в предотрывное состояние при $\bar{l}=0,8$, $n=1,75$ и $\bar{l}=1$, $n=2$. Объяснением такого характера изменения угла θ может служить общеизвестный факт, что для получения максимальной восстановительной способности диффузора необходимо создать предотрывное состояние пограничного слоя при возможно мень-

шей его толщине. Это означает, что сразу же за входным сечением канал должен иметь максимально возможное (из условия отсутствия отрыва) раскрытие, а в дальнейшем по длине канала должен быть создан уменьшенный градиент давления, чтобы поток не отрывался, оставаясь в предотрывном состоянии [9].

Ограничение на величину угла θ для выходного сечения оптимального диффузора позволило в процессе оптимизации обеспечить низкий уровень коэффициента потерь с выходной скоростью и ускорить сам процесс.

При осевом входе потока в диффузоры коэффициенты полных потерь безотрывного ($l=1,0$ м), предотрывного ($l=0,65$ м) и оптимального ($l=0,5$ м) диффузоров практически одинаковы и меньше на 16% относительных по сравнению с диффузором-прототипом ($l=0,5$ м).

При угле закрутки потока на входе в диффузоры 40° коэффициент полных потерь оптимального диффузора в 1,4 раза меньше, чем у предотрывного диффузора и примерно в 2 раза меньше, чем у диффузора-прототипа.

Заключение

Разработана методика оптимального проектирования кольцевых диффузоров турбомашин на основе новых методов решения прямой и обратной аэродинамических задач.

Методика позволяет разрабатывать высокоэффективные конструкции безотрывных кольцевых диффузоров, а задача оптимального проектирования – задача нелинейной невыпуклой оптимизации, которая обеспечивает выполнение ограничений на габаритные размеры диффузора и на возникновение отрывов пограничного слоя.

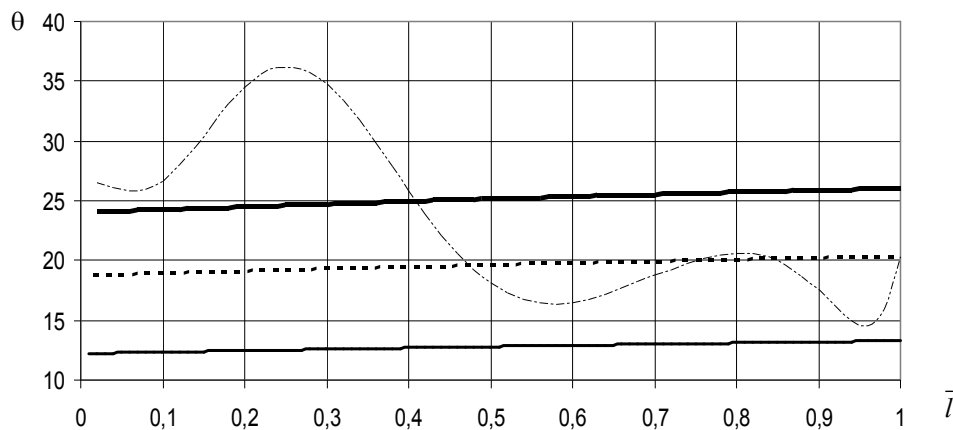


Рис. 2. Изменение угла θ вдоль безразмерной осевой длины \bar{l} диффузоров с $n=2$:
 — $l=1$ м, $\alpha=18,3^\circ$; - - - $l=0,65$ м, $\alpha=25^\circ$; — $l=0,5$ м, $\alpha=35,7^\circ$; — · — · — оптимальный

Литература

1. Субботович, В. П. Обтекание трехмерным потоком решетки профилей турбомашин на поверхности вращения [Текст] / В. П. Субботович, А. Ю. Юдин, Ф. К. Там // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Х., 2008. – Вып. 6. – С. 41–46.

2. Субботович, В. П. Обратная задача теории решеток на осесимметричной поверхности тока [Текст] / В. П. Субботович, А. Ю. Юдин, Ф. К. Там // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Х., 2009. – Вып. 3. – С. 56–61.

3. Субботович, В. П. Определение параметров осесимметричного потока в торцевом сечении кольцевого канала [Текст] / В. П. Субботович, С. А. Темченко // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Х., 2008. – Вып. 6. – С. 52–55.

4. Субботович, В. П. Обратная задача для кольцевого канала [Текст] / В. П. Субботович, С. А. Темченко // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Х., 2010. – Вып. 3. – С. 56–60.

5. Субботович, В. П. Результаты тестирова-

ния метода расчета течения в кольцевых каналах [Текст] / В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. Ю. Юдин, С. А. Темченко // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Х., 2012. – Вып. 8. – С. 91–94.

6. Новый способ управления отрывом потока рабочих сред в широкоугольных диффузорах паровых и газовых турбин [Текст] / А. Е. Зарянкин, А. Н. Парамонов, Е. Ю. Григорьев [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – Вып. 5. – С. 5–10.

7. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / А. Ш. Дорфман, М. М. Назарчук, Н. И. Польский [и др.] // Изд. АН УССР. – 1960. – 292 с.

8. Чичинадзе, В. К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации [Текст] / В. К. Чичинадзе. – М.: Наука, 1983. – 256 с.

9. Мигай, В. К. Проектирование и расчет выходных патрубков турбомашин [Текст] / В. К. Мигай, Э. И. Гудков. – Л.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

Поступила в редакцию 2.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. теории авиационных двигателей Л. Г. Бойко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

ЗАСТОСУВАННЯ ОБЕРНЕНОЇ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КІЛЬЦЕВИХ ДИФУЗОРНИХ КАНАЛІВ

В. П. Субботович, О. Ю. Юдин, С. О. Темченко

Розглянуто результати проектування кільцевого дифузорового каналу на основі нових методів розв'язування прямої та оберненої аеродинамічних задач, спеціально розроблених для оптимального проектування. В цих методах аеродинамічні задачі представлені обмеженою множиною не пов'язаних між собою задач нелінійного програмування, які можна розв'язувати в будь-якій послідовності або паралельно. Задача оптимального проектування – задача нелінійної невіпуклої оптимізації за умови наявності обмежень на геометричні характеристики дифузора. Виконано проектування дифузору з криволінійними обводами. Показано, що розроблений дифузор має низький коефіцієнт повних втрат завдяки раціональному співвідношенню локальних ступенів розширення та кута розкриття.

Ключові слова: турбомашинна, вісесиметрична течія, кільцевий дифузор, пряма та обернена аеродинамічні задачі.

APPLICATION OF INVERSE AERODYNAMIC PROBLEM FOR ANNULAR DIFFUSER DUCTS OPTIMIZATION

V. P. Subotovich, A. Yu. Yudin, S. A. Temchenko

The results of the annular diffuser duct design based on new methods for direct and inverse aerodynamic problems specially created for the optimum design are considered. In these methods aerodynamic problems are presented by limited set of unrelated problems of nonlinear programming, which can be solved in any order or in parallel. The problem of optimal design is a problem of nonlinear non-convex optimization with the diffuser geometric characteristics constraints. It is shown that the designed diffuser with curved lines has the small coefficient of total losses due to the rational combination of the local expansion ratio and the aperture angle.

Keywords: turbo-machine, axial-symmetric flow, annular diffuser, direct and inverse aerodynamic problems.

Субботович Валерій Петрович – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. каф. турбиностроения Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Юдин Александр Юрьевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр. каф. турбиностроения Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Темченко Сергей Александрович – мл. науч. сотр. каф. турбиностроения Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: houms@inbox.ru.