

УДК 621.515

В.П. ГЕРАСИМЕНКО¹, М.Ю. ШЕЛКОВСКИЙ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина²"Заря"- "Машпроект" ГП НПКГ, Украина

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА ГТД

Выполнена симплекс-методом параметрическая оптимизация рабочего колеса ступени осевого компрессора с "управляемой диффузорностью" профилей на основе расчетов трехмерного вязкого течения с использованием программного комплекса ANSYS CFX и разработанной авторами управляющей программы. Основными варьируемыми переменными оптимизации являлись: положение максимального прогиба средней линии профиля, наклон линии центров тяжести профилей в радиальном направлении лопатки и парусность рабочей лопатки. В качестве критерия оптимизации использован коэффициент полезного действия ступени.

Ключевые слова: компрессор, рабочее колесо, КПД, оптимизация, управляемая диффузорность.

Введение

Повышение эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) за счет увеличения их параметров цикла достигается одновременным совершенствованием турбомашин [1] в направлениях исследований:

- создание современных программных комплексов аэродинамических расчетов [2];
- разработка высоконапорных компрессорных ступеней [3];
- снижение перетекания в радиальном зазоре рабочего колеса [4];
- учет нестационарного взаимодействия лопаточных венцов [5] и многие другие.

1. Формулирование проблемы

Целью данной статьи является оптимизация высоконапорного рабочего колеса осевого компрессора на основе решения уравнений Навье-Стокса. В качестве критерия оптимизации использован КПД.

Различная природа потерь в компрессорных решетках предопределила, судя по публикациям, направления исследований по снижению отдельных их видов. Применение "управляемой диффузорности" межлопаточных каналов [6 – 8], снижение волновых потерь в скачках уплотнения при сверх- или трансзвуковом обтекании профилей лопаток в решетках [1], оптимизация радиального зазора над рабочим колесом [4, 9] и т.п. – примерный перечень узконаправленных задач в публикациях. Однако такое разделение задач оптимизации является искусственным, ввиду существенного взаимного влияния перечисленных факторов на величину потерь, а следовательно, и на

КПД компрессора. Поэтому целесообразно решать задачу оптимизации рабочего колеса как многопараметрической системы. Последовательный факторный анализ может быть здесь оправданным только для предварительного упрощения моделирования отдельных эффектов.

2. Результаты исследования

"Управление диффузорностью" межлопаточных каналов компрессорных решеток профилей при двухмерном проектировании направляющих аппаратов подтвердило положительный эффект не только по снижению потерь, но и по повышению аэродинамической нагрузки и увеличению запасов по срыву потока [6-8]. Диффузорность на стороне разрежения профиля обычно распределяют согласно известной идее формирования пограничного слоя под действием положительного градиента давления при минимальных касательных напряжениях трения и безотрывном течении. На стороне давления при этом стараются обеспечить примерно постоянное давление. Такое распределение давлений требует соответствующего профилирования лопатки.

Применение сверхзвуковых и трансзвуковых лопаточных венцов в компрессорах авиационных ГТД направлено, в первую очередь, на уменьшение их удельной массы за счет увеличения степени повышения давления ступеней [1 – 3]. Хотя при этом заметно снижают КПД ступеней волновые потери в скачках уплотнения. Даже при дозвуковых, но больших скоростях потока на входе в решетку ($M_{w1} = 0,85 - 0,9$), максимальная скорость на сто-

роне разрежения лопатки часто превышает скорость звука, что приводит к возникновению местного скачка уплотнения. Наличие скачка и его место расположения существенно влияют на величину потерь не только из-за волновых потерь, но и за счет возможного отрыва пограничного слоя на скачке уплотнения, поскольку рост давления на нём в совокупности с продольным градиентом давления ускоряет этот отрыв. Ослабить эти эффекты можно "управлением диффузорности" с бескачковым торможением потока.

Волновые потери в высоконапорных сверхзвуковых компрессорных ступенях можно также снизить выбором оптимальной системы скачков уплотнения аналогично проектированию входных устройств силовых установок сверхзвуковых самолетов с учетом эффектов прямого замыкающего скачка. Стремление снизить волновые потери применением S-образных профилей [1], увеличением хорды рабочих лопаток [2] и густоты сверхзвуковых решеток однако замедляет уменьшение удельной массы двигателя. Кроме того, понижение КПД сверхзвуковых компрессоров, усложнение технологии изготовления их лопаток и удорожание конструкционных материалов ограничивают применение таких компрессоров в энергетических ГТД.

Оптимизация параметров рабочих колес компрессоров усложняется их вращательным движением, наличием радиальных зазоров, нестационарным характером течения, возможным вибрирующим движением сверхзвуковых или трансзвуковых рабочих лопаток и др. В существующих публикациях по щелевым профилям и генераторам вихрей [3], парусным и стреловидным рабочим лопаткам и их окружному навалу, к сожалению, отсутствуют надёжные рекомендации. В то же время эти исследования свидетельствуют о необходимости учета трехмерного характера обтекания особенно рабочих лопаток при оптимизации их профилирования.

Развитие расчетных методов анализа потока в турбомашине на базе использования быстродействующих ЭВМ позволяет проектировать решетки с произвольной формой лопаток. Выбор оптимальной формы требует автоматизации этого процесса. Одним из методов автоматизации является численная оптимизация, для реализации которой в существующие алгоритмы программных комплексов прямых аэродинамических расчетов включают управляющие программы с диалоговой или автоматизированной оптимизацией. Оптимизацию осуществляют путем варьирования геометрических параметров профилей. Для упрощения задачи стремятся к описанию геометрических характеристик минимальным количеством переменных в виде полиномиальных зависимостей. Аналитическое описание поверхности лопатки – наиболее эффективный путь в решении подобных задач. Однако стремление к минимизации количества переменных может быть существенным ограничением в дос-

тижении оптимума ввиду многообразия источников потерь в решетках. Несмотря на это, такие подходы все же позволили выявить эффекты "управления диффузорностью" направляющих аппаратов с двумерным анализом течения на кольцевых поверхностях.

Существенно усложняется задача оптимизации рабочих колес с пространственной формой лопаток при трехмерном их обтекании. Поэтому приходится ограничивать количество варьируемых переменных или проводить исследования по оптимизации геометрических параметров с минимизацией основных источников потерь [9]. Такие подходы приемлемы только для получения качественных результатов при моделировании процессов ввиду наличия существенного взаимного влияния между источниками потерь. В этой связи представляется целесообразным решать задачу оптимизации путем оценки максимально достигаемых значений КПД компрессорной ступени в сравнении с аналогами подобного класса. Такой подход был принят в данной работе, где были учтены современные достижения в компрессоростроении и опыт авторов.

Основными источниками потерь предполагались потери в трехмерном пограничном слое на поверхности рабочей лопатки, потери в радиальном зазоре и двугранном углу на выходе между втулкой и выпуклой стороной лопатки. При этом использован тип профиля лопатки, полученный по методу "управляемой диффузорности". Парусность лопаток, величина радиального зазора, густота решетки, относительное положение максимального прогиба профиля выбраны согласно исследованиям авторов [4,9]. Расчетные исследования выполнены на основе программного комплекса ANSYS CFX с разработанной авторами управляющей программой оптимизации симплекс-методом. Основные варьируемые переменные: положение максимального прогиба средней линии профиля, наклон линии центров тяжести профилей в радиальном направлении лопатки и парусность лопатки. Отличительной особенностью профилей наряду с парусностью и типом профиля была обратная S-образность по выходной кромке, принятая для ослабления эффекта радиального зазора по потерям. Для учета взаимного влияния лопаточных венцов расчеты по оптимизации рабочего колеса с $\bar{d}_{a0} = 0,811$ и $\bar{h} = 1,74$ проводились в системе двух ступеней. В результате оптимизации КПД ступени повысился на 1,6% до 0,92 при $\bar{C}_{1a} = 0,46$, $\bar{H}_s = 0,27$, $M_{w1n0} = 0,7$.

Такое КПД получено в результате 13 расчетов: исходного варианта ступени, 5-и расчетов в

точках начального симплекса и 7-и расчетов в точках движения к оптимуму. Анализ результатов подтвердил целесообразность этого исследования.

Вывод

Полученные результаты свидетельствуют о возможном повышении КПД компрессора путём оптимизации пространственного профилирования лопаток рабочих колес и направляющих аппаратов.

Литература

1. Беккер. Разработка трансзвукового компрессора для мощных энергетических газовых турбин / Беккер, Квасневский, Швердтнер // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*, 1983. – № 3. – С. 16-21.
2. Расчеты двух- и трехмерных трансзвуковых течений в решетках с использованием уравнений Навье-Стокса / Вайнберг, Янг, Макдональд, Шамрот // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*, 1986. – № 1. – С. 58-68.
3. Виннестром. Высоконапорные осевые компрессоры: История разработки и дальнейшее развитие / Виннестром // *Современное машиностроение. Сер.: А.* – 1997. – № 3. – С. 98-112.
4. Герасименко В.П. Эффекты радиального зазора в турбомашинах / В.П. Герасименко, Е.В. Осипов, М.Ю. Шелковский // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2004. – № 8 (16). – С. 51-58.
5. Окииси. О влиянии взаимодействия следов рабочих лопаток на аэродинамические характеристики направляющего аппарата компрессора / Окииси, Хэтэвей, Хансен // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*, 1985. – № 2. – С. 200-202.
6. Зангер. Использование методов оптимизации при проектировании компрессоров с управляемой локальной диффузорностью межлопаточных каналов / Зангер // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*, 1983. – № 2. – С. 25-33.
7. Хоббс. Применение метода управляемой диффузорности при разработке профилей лопаток для осевых многоступенчатых компрессоров / Хоббс, Вайнголд // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. 1984, № 2. – С. 1-10.
8. Рехтер. Сравнение аэродинамических профилей с управляемой диффузорностью с обычными профилями NASA65 для направляющих лопаток многоступенчатого осевого компрессора / Рехтер, Штайнерт, Леман // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*, 1985. – № 3. – С. 153-158.
9. Герасименко В.П. Оптимизация геометрических параметров лопаток турбомашин решением прямой аэродинамической задачи / В.П. Герасименко, Е.В. Осипов, М.Ю. Шелковский // *Наукові праці. Сер.: Техногенна безпека. Науково-методичний журнал.* – Миколаїв: МДГУ, 2006. – Т. 53, Вип.4. – С. 133-140.

Поступила в редакцию 28.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой А.В. Бойко, Национальный технический университет "ХПИ", Харьков.

АЕРОДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА КОМПРЕСОРА ГТД

В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковський

Виконана симплекс-методом параметрична оптимізація робочого колеса ступені осьового компресора з "керованою дифузорністю" профілів на основі розрахунків тривимірної в'язкої течії з використанням програмного комплексу ANSYS CFX і розробленої авторами керуючої програми. Основними варійованими змінними оптимізації були: положення максимального прогину середньої лінії профілю, нахил лінії центрів тяжіння профілів в радіальному напрямку лопатки і парусність робочої лопатки. Як критерій оптимізації використаний коефіцієнт корисної дії ступені.

Ключові слова: компресор, робоче колесо, ККД, оптимізація, керована дифузорність.

AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF COMPRESSOR IMPELLER GTE

V.P. Gerasimenko, M.Y. Shelkovsky

A parameter optimization of the axial compressor stage impeller with "controlled diffusivity" of profiling by the simplex method are performed on the basis of three-dimensional viscous flow calculations using the software package ANSYS CFX and developed by the authors control program. The main variables optimization parameters were: the position of maximum deflection of the middle line profile, the angle of curvature of the line of centers of gravity profiles in the radial direction vanes and blades windage. The efficiency is used as a criterion of optimization.

Key words: compressor, impeller, efficiency, optimization, controlled diffusivity.

Герасименко Владимир Петрович – д-р техн. наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

Шелковский Михаил Юрьевич – инженер-конструктор ГП НПКГ "Заря"- "Машпроект", Николаев, Украина.