

СИСТЕМА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБТЕКАНИЕМ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Коротыгин А. А. , Багров С. В. , Пятунин К. Р.
Рыбинская государственная авиационная технологическая
академия
имени П. А. Соловьёва, ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск, Ярославская область,
Россия

Одной из основных тенденций развития многоступенчатых компрессоров является уменьшение числа ступеней при сохранении или росте суммарной степени сжатия в компрессоре, что приводит к увеличению его нагруженности. При повышении нагруженности перспективных компрессоров лимитирующим фактором становятся запасы устойчивой работы, негативное влияние на которые главным образом оказывают лопатки направляющих аппаратов. Одним из методов борьбы с отрывными течениями является активное управление обтеканием лопаток (вдув или выдув воздуха на профиле).

В данной работе исследованы существующие конструкции, выявлены их преимущества и недостатки и предложена оригинальная конструкция системы активного управления обтеканием лопаток, разработана технология изготовления, проведено аэродинамическое проектирование системы и оценено улучшение аэродинамических характеристик на примере трёхступенчатого высоконагруженного компрессора.

В работе предложен активный способ управления, связанный с вдувом и выдувом воздуха. Выдув в пограничный слой в направляющем аппарате осуществляется с помощью воздуха с большим давлением, чем в межлопаточном канале. Выдув воздуха через щели в направлении основного потока по касательной к обтекаемой поверхностью увеличивает энергию пограничного слоя и создаёт устойчивое течение в направлении положительного градиента давления в межлопаточном канале. При отсосе пограничного слоя в направляющем аппарате определённая масса воздуха удаляется с поверхности лопаток через щели или пористые участки во внутреннюю полость лопаток, что позволяет предотвратить накопление пограничного слоя и образование срывных вихрей.

В качестве модели для проведения исследований и модифицирования был выбран высоконагруженный трёхступенчатый компрессор ($\Pi_t=0.4$), не имеющий аналогов по напорности среди существующих компрессоров авиационных двигателей и энергетических установок.

Вместо двухрядного направляющего аппарата третьей ступени (НА3), используется однорядный аппарат с двумя рядами щелевых отверстий на спинке. Отверстия соединяются с внутренними полостями в лопатке, которые сообщаются с ресивером, расположенным на корпусе над лопаточным венцом.

На направляющий аппарат первой ступени (НА1) выполнено аналогичное щелевое отверстие, сообщающееся через внутреннюю полость с ресивером НА1.

Отвод воздуха от НА3 и подвод к НА1 осуществляется за счёт разницы перепада давлений с помощью трубопровода между ресиверами.

Технологический процесс изготовления направляющих аппаратов с элементами для обеспечения активного управления течением можно разделить на три этапа.

1. Изготовление лопаток.

Технология изготовления лопаток традиционна и заключается в формообразовании пера из калиброванной малоприпусковой штамповки методами механической (фрезерование) или электрохимической размерной обработки.

2. Прошивка полостей и щелей.

Изготовление полостей в лопатках и щелей для вдува (выдува) воздуха предлагается выполнять физико-химическими методами обработки. В частности полости в пере лопаток предлагается формировать методом электроэрозионной обработки (ЭЭО) с применением профильного электрода-инструмента, для обработки щелевых отверстий на спинке лопаток предлагается применять прошивку методом электрохимической обработки (ЭХО). Обе этих технологии уникальны, так как позволяют производить обработку практически без износа инструмента, с высоким уровнем производительности процессов и приемлемыми параметрами качества поверхностного слоя.

3. Сборка направляющих аппаратов.

В ходе сборки направляющих аппаратов лопатки монтируются в пазы на ресивере и фиксируются к нему сваркой или пайкой. При сборке компрессора ресиверы соединяются между собой трубопроводами для передачи воздуха. Таким образом происходит окончательное формирование системы управления течением.

Произведено аэродинамическое проектирование системы. Оценка эффективности предложенной конструкции производилась с помощью комплекса вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX 11. Расчётная сетка различных модификаций построена в NUMECA AutoGrid v5 и ANSYS ICEM CFD 11 (HA1 и HA3). Размерность сетки окончательной конфигурации – 2.25 млн. гексаэдральных конечных элемента.

Преимуществами предлагаемой системы являются:

- возможность снижения количества ступеней компрессора в 1,5–2 раза;
- значительное повышение запасов устойчивой работы компрессора по сравнению с двухрядными и однорядными вариантами конструкции направляющих аппаратов;
- отсутствие элементов управления (клапанов, дросселей), что увеличивает отказоустойчивость и надёжность системы;
- снижение массы направляющих аппаратов за счёт появления полостей и щелевых отверстий;
- ротор компрессора не подвергается изменениям и сохраняется в исходном виде;
- технология изготовления при данной конструкции не требует специализированного оборудования для диффузионной сварки.

Недостатками предлагаемой системы являются:

- усложнение конструкции и увеличение массы компрессора за счёт появления ресиверов и межресиверного трубопровода;
- удорожание производства направляющих аппаратов первой и третьей ступени.

Среди дальнейших направлений развития системы можно выделить:

- улучшение конфигурации и размещения щелевых отверстий HA3;
- увеличение полости в HA1 для снижения скоростей;
- добавление выдува воздуха со спинки HA2;
- использование отбираемого воздуха для наддува радиальных зазоров между корпусом и лопатками рабочих колёс.

Данная система может найти применение в авиационном и энергетическом машиностроении и других наукоёмких отраслях, где используются компрессора и аналогичные устройства сжатия.