

А.Н. АНЮТИН, канд. техн. наук,
 А.Ф. БРЕХОВ, канд. техн. наук,
 Л.Н. БУСЛИК, канд. техн. наук,
 В.П. ГЕРАСИМЕНКО, канд. техн. наук
 М.М. КУДИН,
 А.С. ХОМЕНКО, канд. техн. наук

СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ ВЫСОКО- ЭФФЕКТИВНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

Особенностью компрессоров малоразмерных двигателей является использование в них ступеней с относительно малыми удлинениями лопаток, что обуславливает высокий уровень концевых и вторичных потерь. Поэтому задача разработки средств проектирования и расчетов этих компрессорных ступеней, которые позволяют создавать эффективные с точки зрения КПД и запасов устойчивой работы компрессоры, является весьма актуальной.

С этой целью авторами предложены методы управления течением в пристеночной области: применение двухпорных направляющих аппаратов с неполным радиальным зазором у втулки (щель, выемка) /1/ и использование наклонных или изогнутых в окружном направлении лопаточных венцов /2/. К настоящему времени отсутствуют какие-либо расчетные инженерные методики, позволяющие оценить эффективность этих мероприятий на стадии проектирования. Вместе с тем признано положительное влияние таких методов управления течением на КПД компрессорных ступеней /3/.

Предложены теоретические решения, описывающие форму течения в пристеночной области ступени, при использовании указанных методов управления потоком /4/. При этом для случая применения направляющих аппаратов со щелями у ограничивающих поверхностей использована гипотеза о размещении центров вихревых движений (парного вихря и вихря перетечек через щель) в одной области и существование такого радиального и осевого размеров щели, когда циркуляция упомянутых индуцированных течений, противоположных по знаку, равны между собой. Тогда в рамках этой модели течения может быть введено понятие эффективной площади щели (произведение радиального и осевого размеров), когда потери механической энергии в пристеночной области минимальны.

В соответствии с разработанной в /4/ моделью течения разработан алгоритм и программа расчета параметров потока и определения потерь в привтулочной области компрессорной ступени с направляющими аппаратами, имеющими щели у втулки. В качестве исходных данных в виде массивов вводятся параметры потока на границе привтулочной области, интегральные толщины пограничного слоя на входе в ступень, геометрические и газодинамические параметры ступени на расчетном режиме. В программе предусмотрен расчет шести вариантов исполнения ступени: одного двухпорного без щели у втулки при определенной величине зазора в лабиринтном уплотнении и пяти вариантов с различным радиальным размером щели при одинаковом ее осевом размере. Цифровая информация при выводе результатов расчета содержит параметры пограничного слоя на выходе из ступени, величины потерь механической энергии в рабочем колесе и направляющем аппарате в форме коэффициентов восстановления полного давления и в форме КПД ступени, учитывающего потери энергии в привтулочной области.

Проведенные расчетные исследования показывают возможность повышения КПД ступени на 0,5...1% при использовании направляющего аппарата со щелью у втулки при определенных радиальных и осевых размерах щели.

Вторым направлением исследований возможности управления течения в привтулочной области явилось использование компрессорных решеток с изогнутыми в окружном направлении лопатками.

Расчет изменения потерь за счет изгиба оси лопатки были проведены с использованием ранее разработанной модели течения /1/, в которой оценивалось соответствующее уменьшение эффективных диффузорностей решеток вблизи от ограничивающих поверхностей корпуса и втулки. Уменьшение максимальной скорости на поверхности профиля, определяющей степень диффузорности, оценивалось по изменению скоростей вблизи присоединенного вихря, имитирующего изогнутую лопатку.

При расчетах варьировались величина суммарных потерь в решетке, доля вторичных потерь, углы на входе и выходе из решетки, удлинение лопатки.

Параметрические исследования показали слабое влияние на потери углов на входе и выходе из решетки, а также удлинения лопатки. Увеличение коэффициента восстановления полного давления в решетке определяется в основном углом наклона оси лопатки у втулки и на периферии, величиной суммарных и вторичных потерь. Уточнение

коэффициента идентификации модели возможно на основе сопоставления опытных данных по решеткам профилей с прямыми и изогнутыми осями лопаток.

Важным направлением явилось исследование особенностей течения в периферийной области осевой компрессорной ступени.

Приведено экспериментальное исследование возможности диагностики состояния проточной части рабочего колеса осевой компрессорной ступени и режима его работы по особенностям распределения давления на стенку статора над ним.

Установлено /4/, что даже для значительного радиального зазора давление, измеренное на стенке статора хорошо согласуется с давлением на профиле в периферийной части лопатки. Таким образом, величина радиального зазора сильно влияет на распределение давления по профилю, однако незначительно - на разницу показаний от измерений на стенке статора и непосредственно на лопатке. Это распределение давления зависит от режима работы ступени по расходу и по частоте вращения, угла установки лопатки, формы профиля (видоизменяющийся при абразивном износе), радиального зазора и прочих факторов. Кроме того, поскольку на поток во вращающемся канале действуют центробежные силы, в пристеночных пограничных слоях развиваются радиальные течения и если в центральной части лопатки появляются забоины либо иные дефекты - изменяется и характер этих радиальных течений, которые влияют на распределение давления на стенку статора над рабочим колесом. Для исследования этих особенностей осуществлен подход в организации измерений, использующий осреднение результатов измерения при фиксированной фазе ротора.

Применен малоинерционный пьезокерамический датчик давления с гибким подводным каналом, показания которого регистрировались автоматизированной измерительной системой. Результаты измерений подвергались обработке с использованием электронных таблиц и разработанного для этих целей программного обеспечения.

Анализ результатов исследования показал следующее:

I. Поле давления на стенку статора над рабочим колесом осевой компрессорной ступени несет информацию о режиме работы ступени (частоте вращения ротора и расходе воздуха через ступень), о окружном и осевом распределениях радиального зазора, о близости к границе устойчивых режимов работы ступени, об отклонениях геометрических параметров отдельных каналов, вызванных как технологией изготовления, так и износом и повреждениями при эксплуатации.

2. Перепады давления между спинкой и корытцем лопатки имеют стационарное окружное распределение, форма которого определяется распределением местного радиального зазора между отдельными лопатками и статором, углом установки лопаток и прочими особенностями геометрии рабочего колеса. Форма этого распределения сохраняется при приближении к ГУР. Наибольшие значения перепадов наблюдаются в средней части профиля (где именно, определяется формой профиля) и уменьшаются к концам профиля. Форма распределения перепадов давления вдоль хорды профиля изменяется при приближении режима работы ступени к ГУР.

3. Особенности окружного распределения перепадов давления на входе в рабочее колесо имеют устойчивую структуру для различных испытаний, причем форма распределения особенностей сохраняется при работе на разных режимах. При приближении к ГУР особенности проявляются более отчетливо. Наибольшие устойчивые отклонения перепадов давления в отдельных каналах наблюдались в области наибольшей амплитуды сигнала (вблизи середины канала). Дисперсия распределений особенностей здесь уже больше. Амплитуда распределения особенностей на выходе из канала невелика и слабо изменяется при изменении режима работы ступени по расходу.

Одной из задач, направленных на повышение надежности, является разработка расчетных методов определения характеристик компрессора и его ступеней, в том числе на режимах вращающегося срыва. Использование принципа максимума потока механической энергии, как основы для обобщения статистических данных позволило получить расчетные соотношения для определения левых ветвей характеристик осевых компрессорных ступеней в виде зависимостей:

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{H}_*}{\bar{C}_{a*}} - A \bar{C}_{a*} \right) \bar{C}_a + A \bar{C}_{a*}^2 ;$$

$$\eta = \eta_* \frac{\bar{C}_a}{\bar{C}_{a*}} + \eta_z \left(1 - \frac{\bar{C}_a}{\bar{C}_{a*}} \right) ,$$

где A — коэффициент, определяемый по статистическим данным; \bar{H}_* , \bar{C}_{a*} , η_* — значения коэффициентов напора, расхода и КПД в опорной точке на характеристике; η_z — величина, характеризующая потери в зонах срыва.

Результаты обобщения статистических данных по характеристикам двенадцати ступеней при частичном вращающемся срыве свидетельст-

вуют о достаточно хорошем их согласовании с аппроксимациями в виде прямых линий. Отдельные проверки показали, что характеристики ступеней на режимах полного срыва также могут быть аппроксимированы прямыми линиями.

Выводы:

1. Разработана методика определения аэродинамической эффективности компрессорной ступени с направляющими аппаратами различного конструктивного исполнения.

2. Показана возможность повышения КПД осевой компрессорной ступени путем выполнения специальных выборок в лопатках у ограничивающих стенок и окружного наклона /изгиба/ пера лопатки.

3. Опытные исследования характеристик течения в периферийной области рабочего колеса компрессорной ступени показали возможность получения сигнала о режиме ее работы, в том числе на левой ветви характеристики.

4. Использование принципа максимума потока механической энергии позволило получить расчетные соотношения для определения левых ветвей характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.С. 877086 /СССР/ Лопаточная решетка турбомшины //А.Н.Анютин, А.Ф.Брехов, Л.Н.Буслик и др. - В.И., 1981, № 40. С. 157.
2. А.с. 1613701 /СССР/ Лопатка осевой турбомшины //А.Ф.Брехов, Л.Н.Буслик, Н.Ю.Козин. -В.И., 1990, № 46. С. 157.
3. Петровичев А.М., Савин Н.М., Смирнов С.А. Влияние окружного изгиба лопаток НА на характеристики компрессорной ступени. -В кн.: Лопаточные машины и струйные аппараты. Вып. 12. 1990, С. 29-42.
4. Повышение эффективности компрессорных ступеней малоразмерного ГТД // А.Н.Анютин, Л.Н.Буслик, В.П.Герасименко и др. - В кн: Авиационно-космическая техника и технология /Труды Харьковского авиационного института. Харьков, 1994. С. 68-73.