

УДК 629.7.035.03-036.34

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА БЕССРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ В КОМПРЕССОРАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю. М. Терещенко

Доктор технических наук, профессор*
Контактный тел.: (044) 406-75-93

И. А. Ластивка

Кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой
Кафедра высшей математики**
Контактный тел.: 067-503-67-56

Л. Г. Волянская

Кандидат технических наук, доцент*
Контактный тел.: (044) 406-75-93

И. Ф. Кинащук

Кандидат технических наук, доцент*
Контактный тел.: 066-286-34-17
E-mail: kinaschuk@gmail.com

*Кафедра авиационных двигателей**

**Национальный авиационный университет
пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

Викладено узагальнені результати досліджень, які показують вплив активних і пасивних методів управління пограничним шаром на характеристики компресорів

Ключові слова: пограничний шар, запас газодинамічної стійкості, методи активного і пасивного керування пограничним шаром

Изложены обобщенные результаты исследований, показывающие влияние активных и пассивных методов управления пограничным слоем на характеристики компрессорных решеток

Ключевые слова: пограничный слой, запас газодинамической устойчивости, методы активного и пассивного управления пограничным слоем

There are generalized results of researches in the article. Influence of active and passive control of boundary layer on compressor characteristics is shown

Key words: boundary layer, gasdynamic stability margin, active and passive control of boundary layer

1. Введение

Течение в газотурбинном двигателе характеризуется присутствием неблагоприятных явлений таких, как скачки уплотнения, вихри, вторичные потоки, отрыв потока. Особое влияние на характеристики осевых компрессоров оказывает срыв потока. Формирование и рост областей оторвавшегося потока могут оказывать значительное влияние на развитие пограничного слоя профиля, что в свою очередь вызывает падение кпд ступени.

2. Течение в срывной зоне

Основным фактором, определяющим вид течения в пограничном слое, является градиент давления. Для

ламинарного пограничного слоя даже малый отрицательный градиент давления может вызвать его отрыв, и перейдет ли пограничный слой в срыв или же произойдет ламинарно-турбулентный переход зависит от величины градиента давления и числа Рейнольдса [1,2,3].

На рис. 1 показана схема поля течения в окрестности области оторвавшегося потока [2]. Ламинарный пограничный слой отрывается от поверхности лопатки и повторно присоединяется к ней. Ниже точки отрыва формируется область обратного течения, скорость обратного течения в этой зоне обычно мала и равна нескольким процентам от скорости течения на границе пограничного слоя. Область обратного течения вытесняет ламинарный пограничный слой во внешний поток, что вызывает снижение отрицательного градиента давления. Во многих случаях

это приводит к снижению градиента поверхностного давления и внешней скорости почти до нуля. Как только происходит переход в оторвавшемся пограничном слое, обмен количеством движения через этот слой в процессе турбулентного смешения уменьшает толщину слоя обратного течения, а также эффект вытеснения.

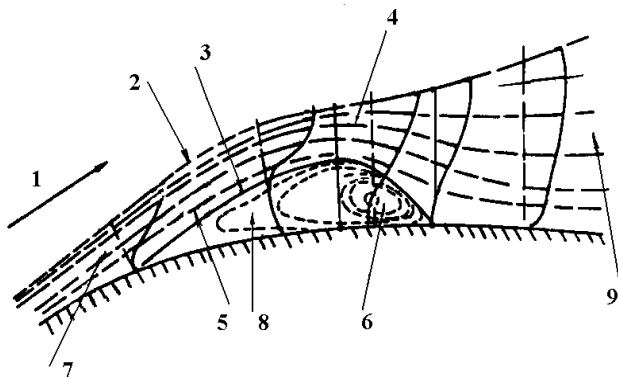


Рис. 1. Схема течения в срывной зоне: 1 - невозмущенный поток; 2 - граница пограничного слоя; 3 - разделяющая линия тока; 4 - отрывающийся турбулентный пограничный слой; 5 - отрывающийся ламинарный пограничный слой; 6 - вихрь в обратном течении; 7 - ламинарный пограничный слой; 8 - застойная область; 9 - заново сформированный турбулентный пограничный слой

Если область отрыва потока мала по сравнению с хордой профиля (обычно меньше 10%), то срывные зоны незначительно влияют на распределение давления на поверхности профилей. Длинная срывная зона приводит к существенному перераспределению давления, причем, уменьшается пик скорости и давления на поверхности лопатки.

Так как характер перехода существенно влияет на обеспечение благоприятного течения в пограничном слое, то при профилировании лопаток основной задачей становится управление началом и развитием турбулентных пограничных слоев.

3. Пассивное и активное управление обтеканием лопаток

Исследования аэродинамических характеристик компрессорных решеток с управлением обтекания лопаток показали, что, воздействуя на пограничный слой, можно существенно улучшить характеристики решеток [3-7]. Это обстоятельство позволило рассматривать методы активного и пассивного управления пограничным слоем на поверхности лопаток как средства повышения аэродинамической нагруженности лопаточных венцов на расчетных режимах и расширения диапазона бесрывного обтекания их на нерасчетных режимах.

В данной работе приведенные результаты исследований ступеней осевых и центробежных компрессоров, в которых расширение диапазона бесрывного обтекания лопаточных венцов обеспечивается за счет реализации пассивного и активного управления обтеканием лопаток.

Анализ зависимостей запаса газодинамической устойчивости по частоте вращения $\Delta K_y = f(\bar{n}_{np})$ для некоторых типов компрессоров с однорядными лопаточными диффузорами позволил выявить наиболее существенное свойство двухрядных лопаточных венцов – бесрывное обтекание их на глубоких дроссельных режимах.

На рис. 2 приведены графики, иллюстрирующие изменение $\Delta \bar{K}_y$ центробежного компрессора при замене однорядного лопаточного диффузора оптимальным двухрядным. Изменение запаса газодинамической устойчивости определяется по формуле

$$\Delta \bar{K}_y = \frac{\Delta K_{yд}}{\Delta K_y} - 1 = f(\bar{n}_{np}),$$

где $\Delta K_{yд}$ – запас газодинамической устойчивости компрессора с двухрядным лопаточным диффузором; ΔK_y – то же, компрессора с эквивалентным однорядным диффузором. Анализ графиков рис. 2 показывает, что при замене однорядного лопаточного диффузора на двухрядный при густоте решетки $b/t = 0,66 - 1,92$ запас газодинамической устойчивости компрессора растет на 8–30%.

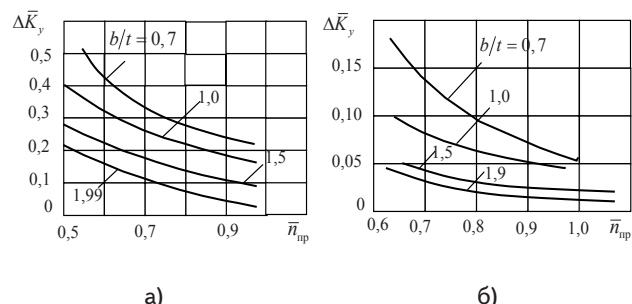


Рис. 2. Зависимости $\Delta \bar{K}_y$ и \bar{n}_{np} центробежного компрессора при замене однорядного лопаточного диффузора оптимальным двухрядным: а) однорядный центробежный компрессор; б) двухрядный центробежный компрессор

Устойчивость течения в выходном лопаточном диффузоре компрессора с однорядным диффузором нарушается в результате образования в лопаточном диффузоре вращающегося срыва. Это явление было зафиксировано при исследованиях характера течения в лопаточных диффузорах на нерасчетных режимах [1, 2].

По мере снижения приведенной частоты вращения к значениям $\bar{n}_{np} = 0,6 - 0,7$ эффект от применения двухрядных решеток в лопаточных диффузорах усиливается и запас газодинамической устойчивости возрастает на 20–48% в сравнении из ΔK_y исходного компрессора с однорядным лопаточным диффузором. На запасе газодинамической устойчивости наиболее сказывается применение в лопаточных диффузорах решеток с малой густотой. Если при $b/t = 1,92$ $\Delta K_y = 1,2$ (т. е. растет на 20%), то при $b/t = 0,66$ $\Delta K_y = 1,48$ (т. е. растет на 48%) при $\bar{n}_{np} = 0,64$.

Исследование газодинамической устойчивости компрессоров с турбулизаторами в лопаточных диффузорах позволило выявить наиболее существенное свойство турбулизаторов – их способность затягивать развитие срыва потока на более глубокие дроссельные режимы. На рис. 3 приведены графики

изменения ΔK_y центробежного компрессора с турбулизаторами на поверхности лопаток лопаточного диффузора.

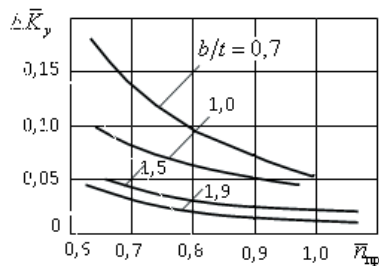


Рис. 3. Зависимость $\Delta \bar{K}_y$ и $\bar{n}_{пр}$ центробежного компрессора с турбулизаторами

Запасы газодинамической устойчивости определялись для установившихся режимов, которые отвечают максимальным КПД при всех частотах вращения ротора компрессора. При $\bar{n}_{пр} = 1$ запас газодинамической устойчивой компрессора возрастает на 1–8% благодаря принудительной турбулизации потока. Этот эффект имеет место при обтекании лопаточных венцов под малыми углами атаки, причем, чем меньше густота решеток, тем эффективнее влияние турбулизаторов на характеристики компрессора.

На сниженных режимах работы компрессора (при $\bar{n}_{пр} < \bar{n}_{прр}$) проявление эффекта принудительной турбулизации потока усиливается, приводя к увеличению ΔK_y на 2–17% в сравнении из ΔK_y исходного компрессора. Наиболее существенно влияют турбулизаторы на обтекание решеток, которые имеют густоты $b/t < 1,5$.

Анализ изменения газодинамической устойчивости $\Delta K'_y = f(\bar{n}_{пр}, c_u)$ компрессоров с активным управлением обтеканием лопаточных диффузоров и $\Delta K_y = f(\bar{n}_{пр})$ позволил выявить одно из наиболее важных свойств лопаточных диффузоров с вдувом в пограничный слой – большую устойчивость их к возникновению срывных режимов при дросселировании.

На рис. 4 показано изменение ΔK_y центробежного компрессора при выдуве воздуха в пограничный слой на поверхности лопаточного диффузора:

$$\Delta \bar{K}_y = \frac{\Delta K'_y}{\Delta K_y} - 1 = f(\bar{n}_{пр}, b/t).$$

Повышение запасов газодинамической устойчивости компрессоров при активном управлении обтеканием лопаточных диффузоров – следствие большей устойчивости течения в пограничном слое. Как и в плоских решетках, более эффективным является использование вдува в пограничный слой на лопатках в диффузорах с малой густотой решеток.

Анализ зависимости $\Delta K_{y0} = f(\bar{n}_{пр}, m_{отс})$ для компрессоров с отсасыванием пограничного слоя в лопаточном диффузоре показал, что управление обтеканием приводит к повышению запасов устойчивости в широком диапазоне режимов работы компрессоров.

На рис. 5 приведены результаты исследований компрессоров с разными диффузорами, которые используют эффект отсасывания пограничного слоя.

Из рассмотрения зависимостей $\Delta \bar{K}_y = f(\bar{n}_{пр}, \bar{m}_{отс})$ следует, что при отсасывании пограничного слоя

в лопаточном диффузоре запас газодинамической устойчивости ΔK_y изменяется практически во всем рабочем диапазоне частот вращения. Для компрессоров, густота решеток лопаточных диффузоров которых, $b/t = 0,66$ изменение ΔK_y составляет от 27% (для $\bar{n}_{пр} = 1$) до 43% (для $\bar{n}_{пр} = 0,65$). Изменение густоты решеток диффузоров до $b/t = 0,96$ приводит к увеличению ΔK_y на 22% для $\bar{n}_{пр} = 1$ и на 38% для $\bar{n}_{пр} = 0,65$. Запасы устойчивости компрессоров с диффузорами, которые имеют густоту решеток $b/t = 1,46$, при отсасывании пограничного слоя растут на 15–35%. В компрессорах с густотой решеток диффузоров $b/t = 1,92$ изменение ΔK_y при отсасывании пограничного слоя составляет 10–33%.

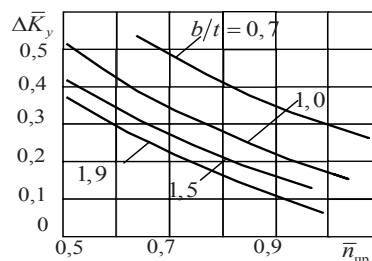


Рис. 4. Функциональная зависимость ΔK_y и $\bar{n}_{пр}$ центробежного компрессора при выдуве воздуха в пограничный слой на поверхности лопаточного диффузора

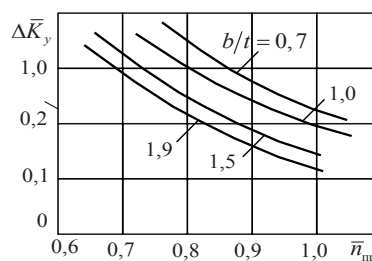


Рис. 5. Изменение ΔK_y и $\bar{n}_{пр}$ в зависимости от разных конструктивных исполнений диффузора

Применение многорядных лопаточных венцов в ступенях осевого компрессора, особенно при высоких окружных скоростях, существенно усложняется в результате недостаточного количества исследований по аэроупругим характеристикам таких венцов. До настоящего времени нет достаточно обоснованных рекомендаций по вопросу, какие элементы осевой ступени (у многоступенчатого осевого компрессора) выполнять многорядными.

Известно, что применение двухрядных лопаток в направляющих аппаратах некоторых осевых ступеней позволило получить в этих элементах большие углы поворота потока и при малых степенях реактивности улучшить их срывные характеристики. Вместе с тем, работа сжатия таких ступеней не превышает 25–30 кДж/кг при окружных скоростях до 300 м/с.

Основные параметры двухрядной лопатки одного из исследованных рабочих колес и зависимость относительного коэффициента потерь ξ от параметров решетки приведены на рис. 6. Суммарный угол пово-

рота потока в лопаточном венце рабочего колеса, которое обеспечивается двухрядными решетками (на расчетном режиме), составлял от $19,6^\circ$ (в периферийном сечении) до $48,3^\circ$ (во втулочном сечении). При окружной скорости $u_k=160$ м/с работа сжатия отдельных ступеней компрессора составляла $H_{ст} = 20 - 22$ кДж/кг. Густота лопаточных венцов рабочих колес изменялась от $b/t=0,978$ в втулочном сечении до $b/t=1,201-1,263$ в периферийном сечении. При окружной скорости около 260 м/с и расходе воздуха на расчетном режиме $m_0=6,6$ кг/с компрессор обеспечивал степень повышения давления $\pi_k=2,5$. На рис. 6 приведены графики для определения оптимального взаимного расположения профилей в двухрядном лопаточном венце рабочего колеса. Условием оптимизации является получение наименьшего уровня потерь полного давления ξ .

Результаты исследований осевой ступени компрессора с двухрядным лопаточным венцом рабочего колеса показали, что при оптимизации параметров двухрядного лопаточного венца рабочего колеса из условия минимума потерь (при сдвиге рядов $h/t=0,68-0,77$ и относительной глубине щели $a/b=0,07-0,025$ на среднем диаметре лопаточного венца) уровень потерь в рабочем колесе ступени на нерасчетных режимах на 10–20% ниже, чем в ступени с однорядным лопаточным венцом, имеющем такой же напор на расчетном режиме. Граница срыва такой ступени (определенная расчетным путем по предельной нагруженности решеток) существенно сдвигается в сторону меньших расходов воздуха. При оценке запаса газодинамической устойчивости по значению ΔK_y , определенному для расчетного режима ($\bar{\pi}_{ст} = 1,8 \bar{q}(\lambda) = 1$) наблюдается увеличение ΔK_y от значений 0,3–0,35 до 0,6–0,65.

На рис. 7 приведены (в относительных параметрах) характеристики ступеней осевого компрессора с однорядным и двухрядным лопаточными венцами рабочего колеса при $\pi_{ст,р} = 1,17$ и окружной скорости на расчетном режиме $u_k = 280$ м/с, определенные по методике, которая основана на использовании обобщенных характеристик плоских компрессорных решеток.

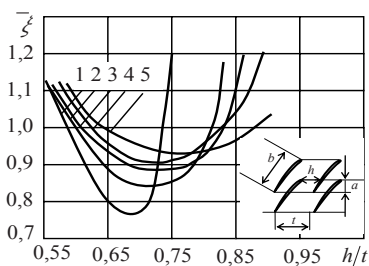


Рис. 6. Зависимости относительного коэффициента потерь ξ от параметров решетки

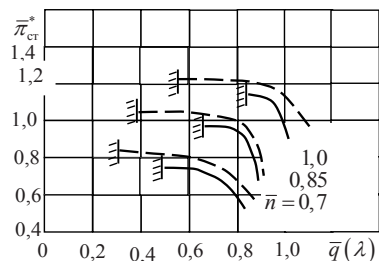


Рис. 7. Характеристики ступеней осевого компрессора (в относительных параметрах) с однорядным и двухрядным лопаточными венцами рабочего колеса

Анализ этих характеристик показывает, что на нерасчетных режимах степень повышения давления ступени с двухрядным лопаточным венцом на 10–15% выше, чем в ступени с однорядным лопаточным венцом.

Выводы

Анализ характеристик компрессоров, использующих эффект управления пограничным слоем, позволяет сделать вывод о влиянии методов активного и пассивного управления пограничным слоем на основные показатели работы компрессоров определенного типа, выявить режимы экономичности использования методов управления обтеканием лопаток и оценить эффективность этих методов. Анализ рассмотренных методов выявил, что они могут рассматриваться как достаточно эффективное средство повышения запасов газодинамической устойчивости компрессоров.

Литература

1. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров. М.: Мир, 2000. - 688 с.
2. Schmidt Gordon S., Mueller Thomas J. Analysis of low Reynolds number separation bubbles using semiempirical methods. // AIAA Journal, 1989. - 27, №8. - P. 993-1001.
3. Терещенко Ю.М., Митрахович М.М. Аэродинамика компрессоров с управлением отрывом потока. К. - Труды института математики Национальной академии наук Украины, том 16, 1996.- 160 с.
4. Терещенко Ю.М. Аэродинамика компрессорных решеток. - М.: Машиностроение, 1979. - 104 с.
5. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. - М.: Машиностроение, 1987. - 168 с.
6. Шлихтинг Г.Ю. Теория пограничного слоя: Пер. с англ. - М.: Наука, 1969. - 413 с.
7. Чжен П. Управление отрывом потока: Пер. с англ. - М.: Мир, 1979. - 365 с.