

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное определение времени пребывания газа в зоне рециркуляции вихревых стабилизаторов пламени. / Абрашкин В.Ю., Мещеряков В.П., Разно В.Г. и др. // Горение в потоке. Межвузовский сборник, Казанский авиационный институт, Казань, 1982, – С.31...35.
2. Матвеев С.Г., Серенков Н.К. Влияние диффузорности канала на аэродинамику закрученного течения. ВИНТИ, N 6003-82 Дсп., М., 1983, 9 с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. ГИИТЛ, М., 1952, 736 с.
4. Распыливание жидкостей. / Бородин В.А. и др., -М.: Машиностроение, 1967
5. Ковылов Ю.Л., Лукачев Е.П. О критерия подобия потоков в центробежных форсунках. // Известия ВУЗов "Авиационная техника", -1976, -№1, -С.49...54.
6. Урывский А.Ф. Гидравлический расчёт вихревых горелок. // Горение в потоке. Межвузовский сборник, Казанский авиационный институт, Казань, 1982, -С.91...97.

УДК 621.45.03.0:532.556.0

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ДИФFUЗОРОВ КАМЕР СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА НК

Лавров В.Н., Епейкин Л.Ф., Савченко В.П.,
Постников А.М., Цыбизов Ю.И.

ОАО СНТК им. Н.Д.Кузнецова, г. Самара

При организации процесса горения в камерах сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) принято снижать скорость потока воздуха перед жаровой трубой КС до приемлемой величины с помощью коротких диффузоров из-за ограниченной длины двигателя. Как правило, эти диффузоры выполняются с большой степенью расширения потока, что и определяет их чувствительность к изменению входного профиля скорости, создаваемого компрессором двигателя.

С повышением параметров термодинамического цикла, современных ГТД ужесточаются требования к гидравлическим характеристикам, окружающей равномерности температурного поля перед турбиной двигателя и надёжности теплового состояния элементов КС при обеспечении большого ресурса. Поэтому возникает сложная проблема получения требуемых параметров и, в частности, безотрывности потока и его стабильности при изменении режима работы двигателя.

В ходе создания каждого образца КС двигателей семейства НК, как правило, проводится большой объём газодинамических исследований на гидротках и пневмоделах с измерениями линий тока в каналах КС зондом с выравниванием статических давлений на боковых его стенках. Это позволяет определять гидравлические потери во всех характерных сечениях пневмомодели, распределение статических давлений вдоль наружного и внутреннего корпусов КС.

В условиях технологических испытаний полноразмерных КС определение гидравлических характеристик основных элементов производится по типовой схеме, приведённой на рис. 1. Подача воздуха с температурой 200°C осуществляется от двигателя НК - 12, измерение расхода воздуха проводится соплом Вентури. Измерение полных давлений выполняется в характерных сечениях 2 — 2, 3 — 3, 4 — 4; в сечениях 2 — 2 измеряется дополнительно статическое давление и температура.

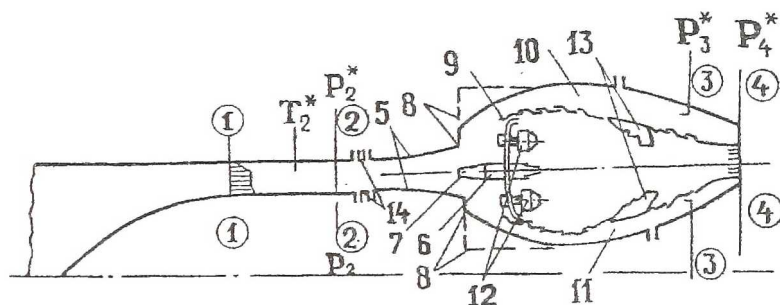


Рис. 1. Элементы конструкции КС и типовая схема измерений давлений при технологических продувках:

1; 2; 3; 4 - №№ сечений с замерах давлений; 5 - стенки кольцевого диффузора КС; 6 - топливный коллектор; 7 - экран для подпора потока в диффузоре; 8 - уступы для внезапного расширения потока на выходе из диффузора; 9 - обтекатели для плавности обтекания Ф.У.; 10, 11 - кольцевые каналы над и под жаровой трубой; 12 - горелочные устройства КС; 13 - "карманы" для увеличения проникновения струй воздуха в набегающий поток продуктов сгорания; 14 - интерцепторы

Принятая схема измерений позволяет с помощью коэффициентов сопротивления ξ_{2-3} учитывать потери в диффузоре, при внезапном расширении потока на выходе из него и в каналах над и под жаровой трубой; ξ_{3-4} — потери давления на жаровой трубе КС. Имитация входной неравномерности поля скорости на входе в диффузор производится специальными интерцепто-

рами (см. поз. 14, рис. 1). При огневых испытаниях с их помощью проверяется чувствительность к изменению окружной и радиальной неравномерности температурного поля на выходе из КС.

Анализ газодинамической стабильности работы различных конструкций диффузоров вновь создаваемых КС (см. таблицу) проводился с помощью зависимостей параметра окружной неравномерности температурного поля на выходе из КС от неравномерности поля скорости на входе в диффузор и от газодинамических параметров диффузора и жаровой трубы:

$$\theta(\bar{w}_{\max}) = f(n_{\text{д}}, \alpha_{\text{пр}}, n_{\text{уд}}, \xi_{\text{д}}, \xi_{\text{уд}}, \xi_{\text{н}}, \xi_{2-3}, \xi_{3-4}, \xi_{2-4} \dots), \quad (1)$$

где: $\theta = (T_{\max} - T_{\text{к}}) / (T_{\text{ср}} - T_{\text{к}})$; T_{\max} , $T_{\text{ср}}$, $T_{\text{к}}$ – соответственно максимальная и среднемассовая температура на выходе из камеры и температура воздуха за компрессором; \bar{w}_{\max} – неравномерности профиля скорости потока за компрессором; $n_{\text{д}}$, $n_{\text{уд}}$ – соответственно степень расширения потока в диффузоре и степень внезапного расширения потока; $\alpha_{\text{пр}} = |\gamma| + |\beta|$ – суммарный приведенный угол образующих кольцевого диффузора (γ – угол наклона наружной образующей кольцевого диффузора, β – угол наклона внутренней образующей), $\xi_{\text{д}}$, $\xi_{\text{уд}}$, $\xi_{\text{н}}$ – соответственно коэффициенты гидравлических потерь в диффузоре, при внезапном расширении потока на выходе из диффузора и на подпор потока, ξ_{2-3} , ξ_{3-4} , ξ_{2-4} – коэффициенты гидравлического сопротивления, измеряемые в сечениях, указанных на рис. 1 и приведенных к скоростному напору потока в сечении 2 – 2.

Известно [1 – 3], что одним из способов повышения безотрывности и обеспечения стабильности течения в условиях меняющейся входной неравномерности профиля скорости является профилирование боковых стенок кольцевого диффузора по закону постоянства градиента нарастания давления по его длине ($dp/dx = \text{Const}$). Как следует из результатов проведенных испытаний кольцевых диффузоров, параметры которых представлены на рис. 2, такое профилирование позволяет расширить область безотрывности потока (кривая 2) по сравнению с прямолинейными коническими и плоскими диффузорами (кривая 1). На рис. 3 приведены результаты обобщения коэффициентов гидравлического сопротивления указанных диффузоров в виде зависимости:

$$\xi_{\text{д}} = f \left[\text{tg}(\alpha_{\text{пр}} / 2)^{0,6} \cdot (1 - 1/n_{\text{д}})^2 \right] \quad (2)$$

При более упрощённом профилировании стенок кольцевых диффузоров двумя сопряжёнными радиусами, минимальное гидравлическое сопротивление было достигнуто при отношении координат точек сопряжения к общей длине диффузора 0,7...0,9 (Петров Н.М. диссертация Рижский институт гражданской авиации, 1989). Таким образом, профилирование кольцевых диффузоров с начальным медленным темпом расширения потока и с последующим более сильным его расширением может способствовать повышению стабильности течения в условиях изменяющейся входной неравномерности профиля скорости.

Таблица. Диффузоры камер сгорания

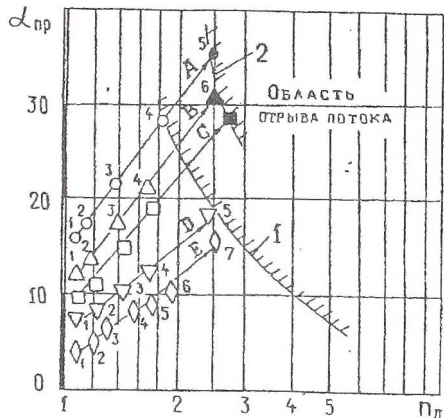
№№ диффузора	Схемы диффузоров К.С.	X/H_0	r_{d1}/r_{d2}	ξ_{2-2}	ПРИМЕЧАНИЯ
1		2	1,55	0,32	Подпор за счет ребер и форкамеры
2 (скамен) А		2	2,5	0,34	Дополнительная стабилизация за счет уступа
3		2,1	1,36 / 1,32	0,4	Стабилизация за счет уступов
4		3,1	1,5 / 1,24	0,38	— " —
5		6,4	1,57 / 1,24	0,4	— " —
6		4,5	1,53 / 1,2	0,5	— " —
7		6,6	2,2 / 1,2	0,38	— " —
8		2,5	1,51 / 1,15	0,42	Стабилизация за счет подпора экраном и уступов
9		2,9	1,9 / 1,18	0,7	— " —

Несмотря на несомненные достоинства профилированных диффузоров по сравнению с непрофилированными, более широкое распространение в кольцевых КС получили более технологичные короткие плоские диффузоры

Рис. 2. Границы предельных параметров безотрывных конических, плоских и криволинейных кольцевых диффузоров $dP/dX = \text{Const}$

1 - плоские и конические диффузоры [2]; 2 - криволинейные кольцевые диффузоры $dP/dX = -\text{Const}$ (А, В, С, D, E);

○, △, □, ▽, ◇ - без отрыва потока;
●, ▲, ◻ - с отрывом потока



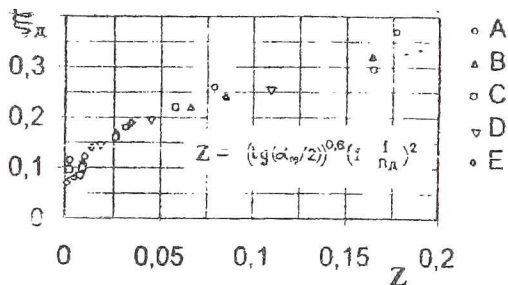


Рис. 3. Коэффициенты сопротивления модельных кольцевых диффузоров $dP/dX = \text{Const}$ (Обозначения см. на рис. 1)

скорости на входе в жаровую трубу КС. Однако, в этих диффузорах происходит повышение на 30...50% гидравлических потерь и ухудшение охлаждения элементов КС из-за возникающих турбулентных пульсаций за диффузором в местах больших уступов.

Для обеспечения безотрывности потока при больших углах $\alpha_{\text{пр}}$ эффективно используют подпор потока плоским экраном [3], с которым можно достичь меньшего уровня гидравлического сопротивления диффузора, чем без экрана. Попытки произвести подпор потока фронтальным устройством приводит к росту потерь на поворот потока при обтекании миделя жаровой трубы. Поэтому для реализации эффекта от подпора потока, на топливный коллектор КС (рис. 1, поз. 6), устанавливается клиновидный экран (поз. 7), который в отличие от экрана [3] частично входил внутрь кольцевого диффузора, образуя два кольцевых канала с наружной и внутренней образующими диффузора. Положительный эффект от подпора потока экраном позволил уменьшить требуемую степень внезапного расширения потока, в связи с чем при наличии экрана, как показано на рис. 1, значительно уменьшен характерный размер уступов. Это позволило перераспределить часть стабилизирующих свойств, связанных с внезапным расширением потока, на подпор потока экраном.

Как видно из рис. 4, применение подпора потока в диффузорах с использованием указанных выше экранов (кривые 3, 4, 5) позволило реализовать больший темп нарастания диффузорности без отрыва потока. Указанные выше предельные параметры для кольцевых диффузоров КС удалось аппроксимировать зависимостью:

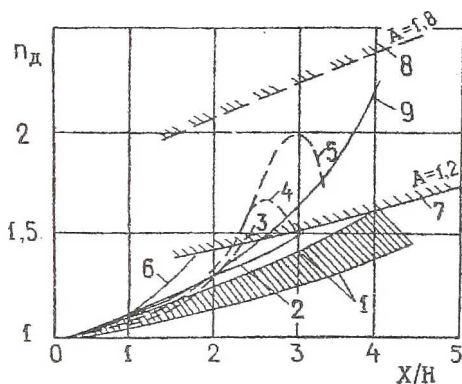
с небольшой степенью расширения потока и с последующим внезапным его расширением. При этом короткий диффузор с небольшим углом расширения потока менее чувствителен к изменениям начальных условий, а внезапное расширение потока задаёт стабильный профиль

$$\eta_d = A + 0,15 \cdot (X/H), \quad (3)$$

где X – продольная координата; H – начальная ширина кольцевого диффузора; $A=1,2$ – граница отрыва потока для диффузора без подпора потока; $A=1,8$ – с подпором потока. Для сравнения на рис. 4 (кривая 9) приведены данные, полученные в подобном кольцевом диффузоре без подпора потока выхлопного устройства двигателя НК 16СТ, в котором отрыв потока соответствует границе $A=1,2$.

Рис. 4. Сравнение характеристик диффузоров с подпором и без подпора потока.

1 - кольцевые диффузоры [2], без подпора потока; 2 - кольцевой диффузор КС двигателя НК-36СТ; 3 - кольцевой диффузор с подпором потока КС двигателя НК-32; 4, 5 - кольцевые диффузоры с подпором потока КС двигателя НК-112; 6 - кольцевой диффузор с радиальными ребрами КС двигателя НК-12СТ; 7, 8 - границы отрыва потока: без подпора потока ($A=1,2$) и с подпором потока ($A=1,8$); 9 - диффузор выхлопного устройства ГТУ НК-16СТ



Постановка экрана в кольцевой диффузор позволяет осуществить не только подпор потока, но и управлять условиями безотрывного обтекания кожухов жаровой трубы, что важно для улучшения их охлаждения и равномерности температурного поля за КС. Сложная картина обтекания фронтowego устройства КС потоком воздуха, выходящим из диффузора, подтверждается замерами статического давления по длине воздушных каналов пневмомодели: замеренный провал статического давления в начале канала свидетельствует о местном ускорении потока с образованием отрыва от стенок кожухов КС. Постановка обтекателей (поз. 9 рис. 1), уменьшила отрыв потока, что сказалось на снижении коэффициента сопротивления жаровой трубы ξ_{3-4} (рис. 5а), при постоянном коэффициенте сопротивления диффузора и каналов над и под жаровой трубой ξ_{2-3} . Приближение жаровой трубы к диффузору привело к росту ξ_{2-3} при постоянном значении ξ_{3-4} (рис. 5б). Это свидетельствует о том, что подпор потока в диффузоре осуществляется экраном, а

не фронтальным устройством. При значительном удлинении экрана происходит одновременное повышение коэффициентов ξ_{2-3} и ξ_{3-4} (рис. 5в).

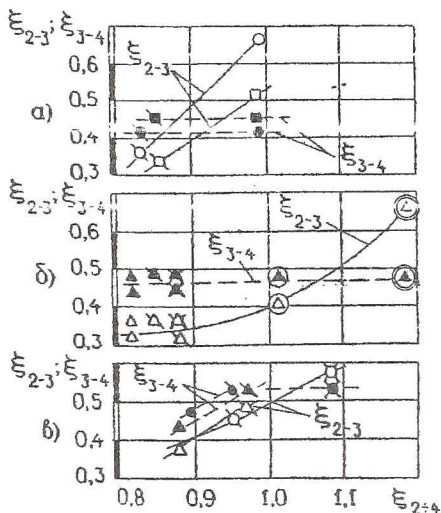


Рис. 5. Влияние конструктивных мероприятий на гидравлические потери.

а) влияние обтекателей:

- , □, □, □ - КС АВ. НК-25;
- , ○, ○, ○ - КС АВ. НК-86;
- , □, ○, □ - с обтекателями;
- , □, ○, □ - без обтекателей;

б) влияние перемещения L жаровой трубы к диффузору:

- △, △ - $L=0$; △, △ - $L=5$ мм;
- △, △ - $L=10$ мм, △, △ - $L=15$ мм;
- △, △ - $L=20$ мм;

в) влияние длины экрана L_3 :

- , ○, ○, ○, ○ - КС двигателя НК-86;
- △, △, △, △ - КС двигателя НК-25;
- , ○ - $L_3=50$ мм; ○, ○ - $L_3=70$ мм;
- , ○ - $L_3=88$ мм;
- △, △ - $L_3=36$ мм; △, △ - $L_3=46$ мм

Компоновка многофорсуночных камер сгорания с кольцевыми диффузорами с подпором потока позволила получить высокую степень окружной равномерности температурного поля перед турбиной ($\theta = 1,2$) и обеспечить надёжность теплового состояния элементов КС и турбины двигателя. При этом сопротивление диффузоров с подпором потока всего на 10-15% выше, чем диффузоров без подпора потока (см. п.3,4,5 таблицы). Повышение коэффициента сопротивления ξ_{2-3} в диффузорах с подпором потока обусловлено увеличением потерь при обтекании жаровой трубы из-за увеличения отношения её миделевого сечения к ширине выходного канала диффузора.

Влияние подпора потока на безотрывность течения на стенках кольцевого диффузора КС объясняется образованием поперечных составляющих скорости при обтекании экрана, направленных в сторону боковых стенок диффузора. Аналогичный эффект проявляется при обтекании продольных гофр на профилях [4] и лепестках диффузорных смесителей ТРДД [5].

Возможно, что высокий темп нарастания диффузорности в КС двигателя НК-12 СТ (см. таблицу и кривую б на рис. 4) достигнут благодаря образующимся поперечным составляющим скорости при обтекании плавных ра-

диальных рёбер, при этом безотрывность потока в диффузоре существенно зависит от величины коэффициента сопротивления жаровой трубы КС.

На основании полученного опыта при проектировании вновь создаваемых КС в соответствии с зависимостью (1) значение ξ_{3-4} принимается не менее 0,4, увеличение потерь на подпор потока экраном принимается равным 10...15%, в соответствии с данными рис. 4 выбирается темп нарастания степени диффузорности по кривым 3; 4; 5 так, чтобы не достичь границы отрыва потока для диффузоров с подпором ($A=1,8$).

Таким образом, разработанный и проверенный на практике подход к оптимизации диффузоров кольцевых КС позволил выполнить требования по параметрам и надёжности предъявляемых к камерам сгорания современных высокоэффективных ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И.Е. Аэродинамика потока и потери напора в диффузорах. // Промышленная аэродинамика, -1947.-№ 3.
2. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. -М.: Энергия, 1970.
3. Повх Н.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении, ГНТИ, МЛ, М, Л 1959.
4. Лебедев Б.П. Экспериментальные исследования диффузоров форсажных камер ТРД. Труды ЦИАМ № 278, -М.: ЦИАМ, 1970.
5. Werle M.L., Paterson R.W., Presz W.M. Trailing-edge separation/stall alleviation. // AIAA Journal, -1987. -2S. -№ 4 -pp.624 - 626.
6. Исследование потерь полного давления в каналах смесителей ТРДД. / Савченко В.П. и др. В сб. КуАИ. «Проектирование и доводка авиационных и газотурбинных двигателей», 1982.

УДК 621.43.056

ОРГАНИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ДВУХЗОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ НА БАЗЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НК

Лавров В.Н., Постников А.М., Роголев В.В., Савченко В.П., Цыбизов Ю.И.

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

Для обеспечения минимального выброса вредных веществ NOx и CO в настоящее время широко применяются двухзонные камеры сгорания (КС), в