

Теплозащитные покрытия из оксида алюминия и оксида циркония проходят испытания на двух автомобилях «КамАЗ» в течение 2-х лет и показывают практически одинаковые результаты. Уже сейчас можно отметить, что в сравнении с серийными машинами возрастает приемистость двигателя, выхлоп стал бледного цвета. В камере сгорания практически не откладываются шлаки.

Описанная выше разработка может быть эффективно применена также и там, где требуется защита металла от высокотемпературного окисления, например на форсунках, подающих топливо, в печах различного назначения.

СТЕНДОВОЕ ИСПЫТАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО СИЛОВОГО ПРИВОДА «НК-16СТ» НА ЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС

Костышев В.А., Климнюк Ю.И., Регов Н.С., Косырев С.А., Анипченко Л.А.
СНТК им. Н.Д. Кузнецова,
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Генеральный конструктор авиакосмической техники академик Н.Д.Кузнецов очень большое внимание уделял обеспечению надежной работы и обеспечению большего ресурса как авиационных двигателей, так и конверсионных двигателей для газоперекачивающих станций. Под его руководством были созданы газотурбинные привода НК-12СТ и НК-16СТ для газоперекачивающих станций газпрома.

В начале 80-х годов прошлого века на Куйбышевском моторном заводе группой инженеров Гасилиным С.С, Ключниковым В.В, Климнюком Ю.И, Дреминым С.А. по инициативе Н.Д.Кузнецова и под общим руководством заместителя главного конструктора Орлова В.Н. был проведен комплекс исследований и экспериментов на установках и полно-размерных двигателях НК-16СТ по проблемам эрозионного износа лопаток компрессора и разработке средств повышающих их эрозионную стойкость.

Опыт эксплуатации наземных газотурбинных установок (ГТУ) показал наличие интенсивного эрозионного износа (ЭИ) проточной части осевых компрессоров. ЭИ вызывается наличием в атмосферном воздухе твердых неорганических примесей, обладающих абразивными свойствами.

В районах с повышенной запыленностью воздуха, и особенно в пустынях и полупустынях, проблема ЭИ стоит особенно остро. ЭИ при-

водит к сокращению ресурса лопаток, к их подрезу в прикорневой части, отрыву их и, как следствие этого, к выходу из строя газотурбинного привода установки.

На эрозионный износ лопаток компрессора влияют концентрация пыли в потоке воздуха, скорость частиц, угол соударения частиц с лопатками, распределение частиц в потоке по размерам, плотность и форма частиц, абразивные свойства частиц, материал лопаток. Степень эрозии лопаток характеризуется потерей ими массы, которая пропорциональна абразивным свойствам материала лопаток и углу атаки.

В результате ЭИ происходит снижение КПД и напора компрессора с возможной потерей газодинамической устойчивости (помпаж двигателя). Известно, что при переборках компрессоров заменяется до 70% лопаток, при этом испытания показывают, что максимальному износу подвергаются в основном лопатки компрессора ВД. Они изнашиваются в прикорневой зоне и, особенно, в зоне входных кромок. В связи с этим, целью данной работы является оценка ресурса проточной части и лопаток компрессоров ГТУ при воздействии пыли различного состава в соответствии с уровнями запыленности атмосферного воздуха в различных природных зонах. Для решения этой проблемы проводились эквивалентные испытания двигателя путем подачи абразивно-опасной пыли во входное устройство.

При проведении таких испытаний необходимо учитывать следующие факторы:

- расположение ГТУ в конкретной природной зоне: на территории России имеется целый ряд природных зон с различной концентрацией пыли, это тундры лесотундры, смешанные леса и тайга, лесостепи и степи, песчаные пустыни и полупустыни. В работе [1] дана таблица: «Природные зоны и концентрация пыли в течении года, мг/м³»;

- допущение о независимости эрозионного и других эффектов воздействия пыли от времени: это допущение справедливо при таких концентрациях пыли в потоке, при которых не происходит столкновения и взаимного влияния частиц в потоке [2]. Указанное допущение подтверждено экспериментальным путем вплоть до концентраций пыли 5г/м³ [3].

В соответствии с ГОСТ 21199-75 система воздухоочистки должна обеспечивать компрессору ГТУ воздухом при остаточной среднегодовой запыленности не более 0,3 мг/м³. В этом воздухе допускается концентрация пыли с размерами частиц до 20 мкм. Эти ограничения должны обеспечиваться за счет оптимального расположения ВОУ двигателя и с учетом различной концентрации эрозионно-опасной пыли на разных высотах относительно поверхности земли.

Экспериментальные исследования показывают, что с увеличением

высоты от поверхности земли концентрация пыли существенно падает. В частности, при изменении высоты с 2 до 6,5 м, т.е. высоты расположения жалюзи воздухоочистительного устройства ГПА-Ц-16 концентрация пыли уменьшается на 15...65%. При этом концентрация эрозионно-опасной пыли снижается в 4...5 раз. Из [1] следует, что во всех рассматриваемых природных зонах среднегодовая концентрация пыли в атмосферном воздухе поступающем на вход в ГТУ ниже максимальной допустимой ГОСТом остаточной запыленности систем воздухоочистки равный $0,3 \text{ мг/м}^3$.

Эффективность воздухоочистительного устройства (ВОУ), согласно межведомственным испытаниям ГПА-Ц-16 составляет 90,3% и определяется как отношение веса задержанной пыли G_2 к весу поступившей на вход $VOY-G_1$.

$$\eta = \frac{G_2}{G_1} \cdot 100, \%$$

Эффективность ВОУ также зависит от фракционного состава частиц пыли поступающих в него.

В табл. 1 представлена эффективность ВОУ ГПА-Ц-16 по фракциям.

Таблица 1

Эффективность ВОУ ГПА-Ц-16 по фракциям

Размер фракции пыли, мкм					
1...10	10...20	20...40	40...60	60...80	80...100
0	53,0	62,0	75,0	81,0	100

Размер пылевых частиц существенно влияет на интенсивность эрозии, которая увеличивается линейно с ростом частиц пыли [4]. Существенную роль при износе играет форма зерен абразивного материала. Экспериментально установлено, что ЭИ от пыли имеющей округлую форму (дорожная пыль) в 2,1...2,6 раза меньше износа от пыли имеющей угловатую форму той же фракции. При проведении эквивалентных испытаний используется искусственная пыль, абразивные свойства которой выше абразивных свойств природной пыли в

$$K = \left(\frac{98,5}{n_{II}} \right)^{2,5} \text{ раз,}$$

где n_{II} - процентное содержание кварца и других частиц с твердостью более 5 единиц в районе эксплуатации. Пылевые частицы размером до 10 мкм округлой формы эрозию практически не вызывают. За эрозионно-

опасную пыль принято считать пыль с частицами более 15 мкм для частиц округлой формы и более 1,0 мкм для частиц угловатой формы имеющих твердость более 5 единиц по шкале МООСа [5].

При испытании двигателя НК-16СТ была использована стандартная искусственная кварцевая пыль, полученная размолом кварцевого песка [6]. Эта пыль имела удельную поверхность (суммарная площадь поверхностей частичек общей массой 1г), равную $5600 \pm 150 \text{ см}^2/\text{г}$. На основании сравнительных исследований пыли в различных природных зонах [1] эта пыль была близка по своим эрозионным свойствам к эрозионно-опасной фракции пыли зоны пустынь и полупустынь.

Для проведения испытания был спроектирован стенд с подачей пыли в расходомерный коллектор см. рис 1.

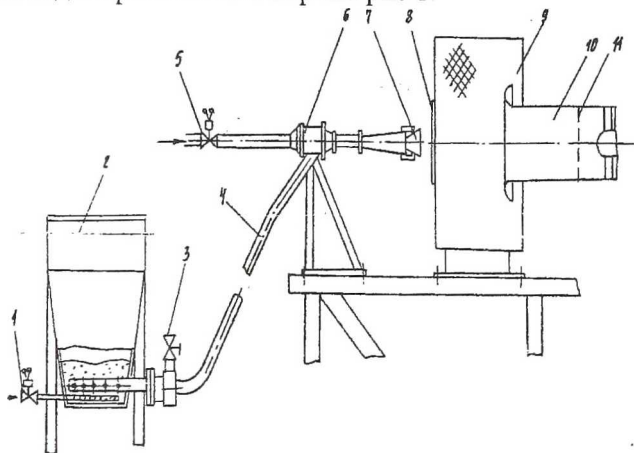


Рис.1. Схема стенда:

- 1- кран подачи воздуха для перемешивания пыли; 2 - бункер с пылью;
- 3 - вентиль изменения концентрации пыли; 4 - шланг подвода пыли;
- 5 - кран включения подачи пыли; 6 - эжектор; 7 - распылитель;
- 8 -рассеивающий экран диаметром 1200 мм; 9 - защитная сетка;
- 10 - входной коллектор; 11 - дросселирующая сетка №2

Для подачи пыли была использована установка, подающая пыль из бункера 2 по шлангу 4 через эжектор 6, использующий в качестве активного газа сжатый воздух, подводимый через дистанционно управляемый кран 5. Кварцевая пыль, предварительно осушенная в печи нагревом при температуре 100°C в течении 30 мин, загружалась в бункер 2 и во время испытания перемешивалась сжатым воздухом, поступающим через дистанционно управляемый кран 1 в специальный коллектор с отверстиями. В связи с тем, что конусный распылитель 7 не обеспечил равномерного

распыла пыли по сечению входного коллектора, а подавал пыль струей диаметром 200 мм, на защитной сетке 9 был смонтирован рассеивающий экран диаметром 1220 мм на расстоянии 1,5м от лемнисканты.

За период испытания двигателя НК-16СТ на вход было подано 340 кг кварцевой пыли за 5 часов 7 мин. В результате износа лопаточной части компрессора произошла потеря газодинамической устойчивости двигателя (помпаж) на $n_{нд пр} = 5300$ об/мин. При следующих запусках помпаж повторялся на режиме $n_{нд пр} = 5150...5200$ об/мин. Средний расход пыли во время испытаний составил 18,8 г/сек, что значительно ниже максимально требуемого расхода пыли, равного 392 г/сек [5].

В табл. 2 приведено количество пыли, поступающей на вход в НК-16СТ за 50000 часов работы в различных природных зонах, а также количество эрозионно-опасной пыли с частицами более 5, поступающей в двигатель за это же время. Приведена величина T_3 - времени наработки двигателя, за которое произошел бы эрозионный износ, в данном испытании, для различных природных зон при условии $n = 2,5$.

Таблица 2

Количество пыли, поступающей на вход в НК-16СТ за 50000 часов работы в различных природных зонах

Параметр	Природные зоны					
	Тундра	Лесотундра	Смешанные леса и тайга	Лесостепь и степь	Полупустыня	Пустыня
1. Количество пыли на входе в ГПА-Ц – 16 за 50000 часов, кг	1480	2427	1615	2558	9698	30967
2. Количество эрозионно-опасной пыли с частицами 1...80мкм и твердостью 5...10 по МООСу на входе в НК-16СТ кг	152	250	157	31	1639	2477
3. Нарботка двигателя до эквивалентного износа при $n=2,5$ T_3 , тыс.час	285	173	275	1395	26,39	17,46

Необходимо отметить, что конфигурация изношенных лопаток компрессора двигателя НК-16СТ после стендового эрозионного испытания имеет сходный характер с результатами полученными при длитель-

ной эксплуатации аналогичных ГПУ на газопроводах. Наибольший износ имел место по лопаткам 6 и 7 направляющих аппаратов компрессора высокого давления. Уменьшение хорды по 6 и 7 НА на НК-16СТ в среднем составило величину 25...35%. Наибольший износ лопаток НА произошел вдоль передних кромок по корытцу у периферии. Рабочие лопатки компрессора ВД в наибольшей степени изношены по периферии с характерным износом передней кромки.

В настоящее время на ОАО СНТК им Н.Д.Кузнецова работы по проблеме эрозионного износа ГТУ продолжаются, при этом используется установка со способом разгона абразивных частиц под действием центробежных сил. Работы проводятся группой инженеров СНТК Косыревым С.А, Шульгой С.И, Анисимовым С.В. под общим руководством д.т.н. проф. Костышева В.А.

Выводы.

1. В процессе этих испытаний была разработана методика и оценен ресурс ГПУ для условий запыленности в различных природных зонах.
2. Полученные результаты показывают, что для обеспечения высокого ресурса газотурбинных приводов в зоне пустынь и полупустынь для защиты от эрозии необходимо применять защитные покрытия.
3. Проведение эквивалентных испытаний на ЭИ компрессорных лопаток с защитными покрытиями на полномерных двигателях целесообразно только на заключительной стадии исследования эрозионной стойкости покрытий.
4. Основные исследования должны проводиться на специальных малогабаритных установках, типа «Тайфун», разработанной на ОАО СНТК им Н.Д.Кузнецова.

Список литературы

1. Техническое задание на проведение эквивалентного испытания двигателя НК-16СТ с искусственным запылением на входе. Самара, 1984г.
2. Яременко О.В. «Испытание насосов», Машиностроение, 1976г.
3. Масленков М.М. «Вертолетные ГТД», Машиностроение, 1966г.
4. Михайлов Е.И, Резник В.А, Кринский А.А. «Комплексные воздухоочистительные устройства для энергетических установок». Л. Машиностроение, 1978г.
5. Орлов В.Н, Павлов В.И, Климяк Ю.И. «Эрозионный износ компрессоров двигателей НК-16СТ», - Технический отчет №001.9622. ОАО СНТК им Н.Д.Кузнецова Самара. 1988г.
6. Орлов В.Н, Радченко В.Д, Гасилин С.С. «Эрозионный износ компрессора двигателя НК-16СТ при проведении эквивалентного испытания с искусственным запылением на входе». ОАО СНТК им Н.Д.Кузнецова Самара. 1986г.