

УДК 629.7.035.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ГТД

Головина Н.Я., Кривошеева С.Я.

*Тюменский государственный нефтегазовый университет, филиал в г. Сургуте, Сургут,
e-mail: ntgolovina@rambler.ru*

В условиях работы на запыленном воздухе происходит загрязнение проточной части двигателя. Это приводит к ухудшению характеристик силовых установок двигателя. В данной работе приводятся результаты исследований массы, плотности, толщины слоя и микроструктуры отложений на лопатках ротора компрессора вертолетного ГТД, имеющего номинальную мощность 883 кВт после отработки 1500 ч. Исследования проводились на десяти лопатках каждой ступени. Лопатки взвешивались до и после очистки, затем рассчитывалась средняя масса отложений. Результаты исследования показывают, что на последних ступенях компрессора плотность отложений больше, чем на первых. Режим с полным проявлением шероховатости для указанного двигателя реализуется на первых шести ступенях компрессора. Сделан вывод о том, что на характеристики пограничного слоя и значение коэффициента трения на поверхности лопаток наибольшее влияние оказывает среднеарифметический размер высоты неровностей R_z . Полученные данные используются для разработки способов очистки проточной части компрессора.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель (ГТД), вертолет, лопатка, отложения

THE STUDY OF DEPOSITS ON THE COMPRESSOR BLADES OF THE HELICOPTER GTE

Golovina N.Y., Krivosheeva S.Y.

Tyumen State Oil and Gas University, branch in Surgut, Surgut, e-mail: ntgolovina@rambler.ru

In the dusty air pollution flowing part of the engine. This leads to a deterioration of the characteristics of the power plant engine. In this paper, the results of studies of mass, density, thickness and microstructure of the deposits on the blades of the rotor compressor helicopter GTE having a nominal capacity of 883 kW after working 1500 hours. Studies were conducted on ten blades of each stage. The blades were weighed before and after cleaning, and then calculated the average mass of sediment. The results study show that in the last stages of the compressor, the density of the sediments is greater than the first stages. Mode with the full manifestation of roughness for the specified engine is implemented on the first six stages of the compressor. The conclusion is that the characteristics of the boundary layer and the coefficient of friction to the surface of the blades has the greatest influence average size height of irregularities R_z . The data obtained are used to develop methods of cleaning flow compressor parts.

Keywords: gas turbine engine (GTE), a helicopter, blade, deposits

Эксплуатация вертолетов вблизи промышленных предприятий и с грунтовых площадок приводит к значительному ухудшению характеристик их силовых установок вследствие образования шероховатых отложений на лопатках компрессора. Механизм образования отложений представляет собой сложную картину взаимодействия частиц пыли и сажи с турбулентным пограничным слоем на поверхности лопаток [2]. Осаждению способствуют вторичные течения в межлопаточных каналах и повышенная турбулентность потока. Отложения образуются на спинках лопаток и представляют собой слой сажи с мелкодисперсной пылью, который ухудшает качество их поверхности из-за роста шероховатости.

Учет влияния шероховатости на развитие пограничного слоя и расчет потерь в компрессоре с отложениями на лопатках необходимы при решении вопросов диагностирования загрязненных газотурбинных двигателей (ГТД). Кроме того, распределение толщины слоя и плотности отложений по ступеням компрессора должно учиты-

ваться при разработке эффективных способов очистки его проточной части [4, 5].

В настоящей работе приводятся результаты исследований массы m , плотности ρ , толщины слоя h и микроструктуры отложений, образующихся на лопатках ротора компрессора вертолетного ГТД, имеющего номинальную мощность 883 кВт после отработки 1500 ч.

На рис. 1 представлено распределение массы отложений на лопатках ротора по ступеням компрессора. Измерения проводились на аналитических весах WA-31 по данным взвешивания десяти лопаток каждой ступени. Лопатки взвешивали до очистки и после нее, затем рассчитывали среднюю массу отложений, отнесенную к площади F поверхности спинки пера. Из рис. 1 видно, что наиболее загрязненными являются первые семь ступеней компрессора. Такой характер зависимости обусловлен наиболее сильным влиянием вторичных течений на первых ступенях, радиальным зазором в рабочих решетках и интенсивным вихреобразованием потока у лопаток регулируемых направляющих аппаратов.

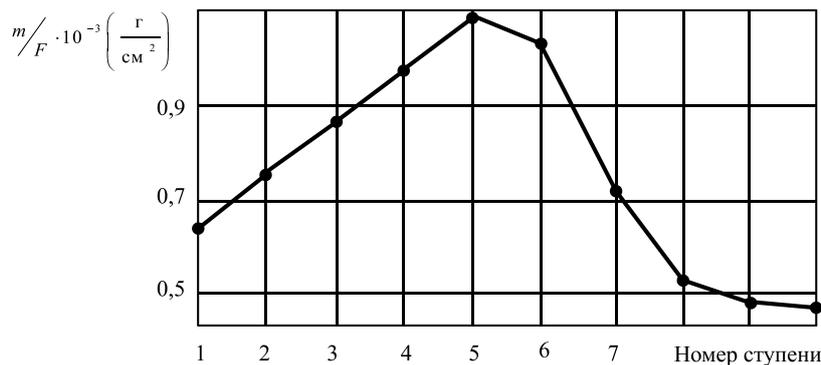


Рис. 1. Распределение массы отложений на лопатках ротора по ступеням компрессора

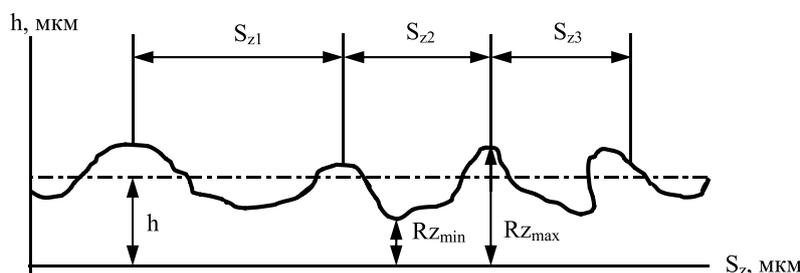


Рис. 2. Микроструктура рельефа отложений на лопатках ротора первой ступени ($\times 240$)

Исследование микроструктуры рельефа отложений выполнялось на шлифах поперечного разреза пера лопаток каждой ступени. Анализировались фотографии, полученные на микроскопе МИМ-8 при 240-кратном увеличении. На рис. 2 показана характерная форма рельефа отложений, образующихся на спинке профиля пера лопатки первой ступени ротора.

Отложения представлены в виде темного слоя между эпоксидным клеем, применявшимся при изготовлении шлифов, и поверхностью лопатки. Видно, что отложения имеют развитую шероховатую поверхность со сложной конфигурацией выступов и впадин. Обработка экспериментальных данных позволяет получить осредненную величину толщины слоя отложений h для каждой ступени, по которой рассчитывается их плотность. Результаты измерений и расчетные параметры приведены в таблице.

Анализ изменения плотности отложений по ступеням компрессора позволяет сделать вывод, что на последних ступенях плотность больше, чем на первых. Увеличение плотности происходит под действием повышенных давления и температуры газа, а также под влиянием активной турбулентной диффузии.

Статистическое описание параметров шероховатости позволяет определить для каждой ступени среднеарифметический размер высоты неровностей R_z (таблица), характеризующийся разностью средних

величин пяти наибольших выступов и наибольших впадин на определенной базе.

Шероховатость поверхности вносит существенный вклад в формирование пограничного слоя, который при определенных условиях может реализоваться в квазигладкое течение или режим с полным проявлением шероховатости [1]. Шероховатость не проявляется до тех пор, пока выступы элементов шероховатости утоплены в вязком ламинарном подслое. Это происходит до достижения некоторого критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = 100$, вычисленного по величине эквивалентной шероховатости принят параметр R_z . Используя данные о газодинамических параметрах потока и геометрических размерах лопаток вертолетного ГТД, можно рассчитывать для каждой ступени допускаемые значения R_{zm} , при которых проявление шероховатости отсутствует (таблица).

Сравнение полученных величин R_z с расчетным R_{zm} показывает, что режим с полным проявлением шероховатости для двигателя, имеющего 1500 ч, реализуется на первых шести ступенях компрессора. На этом режиме пульсационное движение в пограничном слое посредством кажущихся напряжений извлекает часть энергии из потенциального потока. Затем эта энергия за счет турбулентной диссипации преобразуется в тепло. Коэффициент трения на шероховатой поверхности при таком режиме течения в несколько раз больше, чем на гидравлически гладкой.

Параметр	Номер ступени									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m \cdot 10^{-3}, \text{ г}$	13,6	12,1	10,1	8,30	7,60	6,00	3,50	2,40	2,00	1,60
$F, \text{ см}^2$	22,0	16,3	11,6	8,70	7,20	6,00	4,80	4,50	4,10	3,50
$h, \text{ мкм}$	53,0	42,0	32,5	24,5	18,0	12,5	7,60	4,80	4,00	3,40
$m/F \cdot 10^{-3}, \text{ г/см}^2$	0,62	0,74	0,87	0,95	1,05	1,00	0,73	0,53	0,49	0,46
$\rho, \text{ г/см}^3$	0,12	0,18	0,27	0,38	0,58	0,80	0,96	1,10	1,23	1,33
$R_z, \text{ мкм}$	35,0	22,0	15,1	10,4	7,10	4,80	3,20	2,20	1,60	1,30
$R_{z\text{м}}, \text{ мкм}$	6,0	4,7	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,1	2,9	2,7
$S_z, \text{ мкм}$	110	76	59	48	40	33	28	25	23	22
N	3,1	3,5	3,9	4,6	5,6	6,9	8,7	11,2	14,4	16,9

Величина коэффициента трения и характеристики пограничного слоя на шероховатой поверхности, кроме того, зависят от продольного расстояния между вершинами элементов шероховатости и распределения ее по поверхности. В таблице представлены данные о параметре распределения элементов шероховатости N по поверхности. Этот параметр характеризуется отношением среднеарифметического расстояния между вершинами неровностей S_z к величине R_z .

В работе [3] экспериментальным путем получены значения параметра N , при которых возникают различные режимы и структуры течения. Например, при $N \leq 7$ сопротивление поверхности практически постоянно, так как за элементами шероховатости образуются небольшие вращающиеся вихри, которые остаются между ними и не оказывают влияния на течение газа вдали от стенки. Увеличение параметра $N > 7$ приводит к интенсивному росту амплитуды скорости и изменению структуры течения за счет отрыва крупных вихрей и их проникновения в основной поток. Сопротивление такой поверхности увеличивается в 2–2,5 раза. При $N > 16$ происходит постепенное снижение сопротивления поверхности вследствие повторного присоединения потока.

Из таблицы видно, что значения параметра $N > 7$ имеют место на четырех последних ступенях. Однако здесь по параметру R_z режим течения соответствует гидравлически гладкому. Значит, структура турбулентного течения вблизи таких элементов шероховатости соответствует режиму без взаимодействия аэродинамических следов и не зависит от параметра N на всех ступенях компрессора.

Таким образом, исследование микроструктуры рельефа отложений, образующихся на лопатках ротора компрессора вертолетного ГТД после отработки 1500 ч,

показывает, что при расчете влияния шероховатости на характеристики пограничного слоя и при оценке коэффициента трения на поверхности лопаток необходимо учитывать параметр R_z , а влиянием параметра N можно пренебречь. Полученные данные о распределении плотности и массы отложений по ступеням компрессора позволяют разработать эффективные способы очистки проточной части компрессора.

Список литературы

1. Белянин Н.М. Влияние шероховатости поверхности лопаток на течение газа в компрессоре // Тр. ЦИАМ. – М., 1985. – Вып. 1128. – С. 138–149.
2. Занун Э.-С. Масштабирование усредненного потока вдоль пограничных слоев на гладкой и шероховатой стенках // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. Т. 17, № 1. – С. 23–42.
3. Ломов С.А., Ломов И.С. Основы математической теории пограничного слоя. – Издательство МГУ, 2011. – 455 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 742 с.
5. Zanoun E.-S., Durst F., Saleh O., Al-Salaymeh A. Wall skin friction and mean velocity profiles of fully developed turbulent pipe flows // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2007. – № 32(1). – P. 249–261.

References

1. Beljanin N.M. Vlijanie sherohovatosti poverhnosti lopatok na techenie gaza v kompressore // Tr. CIAM. M., 1985. Vyp. 1128. pp. 138–149.
2. Zanun Je.-S. Masshtabirovanie usrednennogo potoka vdol pogranychih sloev na gladkoj i sherohovatoj stenkah // Teplofizika i aeromehanika. 2010. T. 17, no. 1. pp. 23–42.
3. Lomov S.A., Lomov I.S. Osnovy matematicheskoj teorii pogranychih sloja. Izdatelstvo MGU, 2011. 455 p.
4. Shlihting G. Teorija pogranychih sloja. M.: Nauka, 1974. 742 p.
5. Zanoun E.-S., Durst F., Saleh O., Al-Salaymeh A. Wall skin friction and mean velocity profiles of fully developed turbulent pipe flows // Exp. Therm. Fluid Sci. 2007. no. 32(1). pp. 249–261.

Рецензенты:

Бахарев М.С., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Нефтегазовое дело», Тюменский государственный нефтегазовый университет, филиал в городе Сургуте, г. Сургут;

Федоров В.Н., д.т.н., профессор, начальник отдела гидродинамических скважин, ООО «БашНИПИнефть», г. Уфа.