

И. А. Кривошеев, Р. Ф. Камаева, С. А. Струговец

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Рассматриваются закономерности движения частиц пыли в проточной части компрессоров ГТД, особенности эрозии, изменения геометрии лопаток и изменения параметров и характеристик двигателей. Это позволяет учесть условия эксплуатации при проектировании двигателя, разработать меры по защите лопаток от эрозии и средства параметрической диагностики ГТД. *Эрозия; осевой компрессор; параметрическая диагностика*

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время, с учетом природных катаклизмов, все большее внимание уделяется защите авиационных двигателей от пыли, в т. ч. вулканической, а также от попадания пыли, частиц снега и капель воды – при взлете, во время дождя, при полете гидросамолетов и экранопланов у водной поверхности, при движении судов с газотурбинными двигателями (суда на воздушной подушке и т. д.). Актуальным это является для газотурбинных энергоустановок (ГТУ), газотурбинных приводов (ГТП) газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Это заставляет применять комплексные воздухоочищающие устройства (КВОУ) и учитывать влияние эрозии лопаток и загрязнения проточной части на изменение характеристик ГТД и ГТУ в процессе эксплуатации.

Окружающий воздух всегда загрязнен частицами пыли в большей или меньшей степени в зависимости от местонахождения и времени года. Частицы пыли, попадая в проточную часть газотурбинного двигателя (ГТД), приводят к изменению геометрических размеров лопаточных венцов и радиальных зазоров лопаточных машин. Из экспериментальных данных и данных, имеющихся в технической литературе [1, 4, 6], наиболее изнашиваемым элементом двигателя является компрессор. Износ происходит по входной кромке и корытцу лопаток, причем рабочие лопатки изнашиваются в большей мере, чем лопатки направляющих аппаратов.

Несмотря на то, что изучением изменений геометрических параметров лопаточных венцов занимаются в течение многих лет, проблема количественной оценки степени этих изменений

является достаточно актуальной. Ведь изучение и знание протекания износа и степени изменения геометрии лопаток наиболее повреждаемого элемента ГТД – компрессора окажет существенную помощь при разработке новых методов диагностики компрессора, при создании методов и средств защиты от эрозии, а также позволит упорядочить технологический процесс дефектации лопаток при ремонте.

### 1. ПРЕДЫДУЩИЕ РАБОТЫ

Исследованию процесса эрозии посвящено большое количество работ, при этом имеющиеся в технической литературе данные весьма противоречивы. По современным представлениям величина эрозии существенно зависит от угла соударения с поверхностью лопатки и скорости твердой частицы.

По данным Ю. И. Шальмана [1], полученным экспериментально, путем обдува плоских пластин, наибольший износ получился в случае  $\psi = 50\text{--}60^\circ$ , при этом резкое изменение твердости материала почти не повлияло на величину износа. В работе [7] В. Н. Кашеева показано, что значение угла соударения существенно зависит от твердости материалов, при этом для мягких сплавов максимум износа при  $\psi = 20^\circ$ , для более хрупких  $\psi = 45^\circ$  и для самых хрупких  $\psi = 90^\circ$ . По данным, полученным в работе Билика Ш. М. [8], сделан вывод, что максимальный износ в большинстве случаев происходит при  $\psi = 45\text{--}60^\circ$ .

Частицы пыли движутся иначе, чем воздушный поток. Различия в скоростях движения частиц и воздуха зависят от размеров, массы, парусности частиц и т. д. В работе В. Г. Терещенко [9] определены величина и направление скорости соударения абразивной частицы с лопаткой вентилятора. Использовано сочетания

ние расчета скорости воздуха с практическим определением направления удара.

В работе Ф. П. Ходеева [2] была проведена работа по выявлению фактических диапазонов изменения геометрических параметров лопаточных венцов компрессора вдоль его проточной части в процессе выработки ресурса. В ряде работ предприняты попытки разработать теорию, описывающую соударение частиц с цилиндрической поверхностью и траекторию, при этом изучались траектории частиц разного размера при ударе о твердую поверхность, соответствующие эффекты пограничного слоя, эффективность и плотность соударения и т. д.

Несмотря на то, что изучению процесса посвящено большое количество работ, оценка изменений параметров и определение степени эрозии является достаточно актуальной. Ведь с эрозией связано большое количество отказов и поэтому она заслуживает значительного внимания при проектировании.

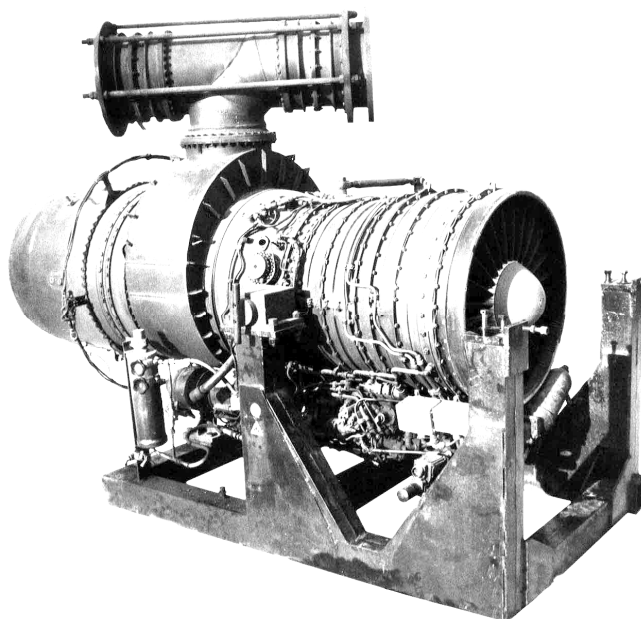
## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИССЛЕДУЕМОМ ОБЪЕКТЕ

Установка УКП-5 предназначена для продувки магистральных трубопроводов (рис. 1). Летом и осенью 2000 году она эксплуатировалась на участках трассы строящегося нефтепровода КТК, проходящих по территории Республики Калмыкия и Ставропольского края, в запыленной атмосфере полупустынь с повышенной концентрацией частиц абразивного вещества в воздухе. УКП-5 не снабжена пыле-

защитным входным устройством. Несмотря на принимавшиеся меры, такие как увлажнение грунта рядом с установкой и укладка защитного нетканого материала под входное устройство, начала интенсивно развиваться эрозия лопаток компрессора (в основном КВД, что определялось визуально через лючки осмотра ГСВ). Это привело сначала к плавному, а потом к резкому изменению параметров работы ГСВ (велся подробный хронометраж).

Эксплуатация УКП-5 была прекращена в связи с тремя случаями помпажа, после суммарной наработки около 128 часов (за два с половиной месяца эксплуатации в указанных зонах). Следует отметить, что потеря газодинамической устойчивости произошла на фоне увеличившегося на приблизительно 8% скольжения роторов. Таким образом, за счет двухвальной схемы Р95Ш, компрессор до последнего предела сохранял устойчивость, компенсируя эрозию лопаток КВД раскруткой РВД.

Основной ущерб лопаткам компрессора был нанесен внезапной песчаной бурей (смерчем) при наработке около 80 часов (с этого момента стал ощутим «дрейф» параметров). Видимость при буре была не более 5...7 м. Установку удалось остановить только через примерно 4 минуты работы, в связи с заклиниванием обратного клапана аварийной отсечки от накаченного воздухом трубопровода. По-видимому, установка была остановлена при критическом состоянии лопаток КВД, когда их профиль еще сохранился, но толщина стала минимальной.



**Рис. 1.** Генератор сжатого воздуха ГСВ-95, подвергшийся эрозии при использовании при продувке газопровода в Калмыкии

Моделировать этот процесс следует с очень большой плотностью пыли и песка (не менее  $10 \text{ г/м}^3$ ) с частицами в широком диапазоне размерности, где основную массу составляют частицы от 0,1 до 2 мм. Сила ветра была такой, что могла поднять и более крупные частицы.

Потом установка была переброшена в Калмыкию. Там в воздухе практически всегда висит лессовая пыль, а это частицы не более 20 мкм. Установка эксплуатировалась там и ранее, но только после встречи с песчаной бурей начался «дрейф» параметров. С наработки 100 часов – снова Калмыкия. Запыленность атмосферы минимальная (только самые мелкие частицы, которые там «висят» в воздухе практически всегда). Несмотря на это, отмечено катастрофическое увеличение скольжения роторов ( $n_2 - n_1$ ), которое, кстати, помогало машине до предела сохранять газодинамическую устойчивость. У однокаскадного компрессора помпаж наступил бы гораздо раньше. При этом положение рабочей линии холостого хода в координатах  $\pi_k^* = f G_{в пр}$  характеристики КВД, судя по отсутствию сильного изменения соотношения  $n_{1пр}$ ,  $P_{к пр}$  и  $T_{т пр}$ , на этом режиме, продолжало сохраняться.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ВОЗДУХА НА ПАРАМЕТРЫ СТУПЕНЕЙ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА И ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ

В данной статье проведена работа по выявлению геометрических размеров лопаточных венцов при эрозионном износе, а также определены скорости движения частиц пыли в канале и характер износа по проточной части.

Правильная оценка траектории движения частиц пыли в межлопаточном канале имеет существенное значение при изучении процесса эрозии. В силу большей плотности частиц пыли их траектории имеют меньшую кривизну, чем траектории частиц газа.

В первом приближении можно учесть, что и в меридиональном сечении, и в рамках поверхностей тока (в рамках элементарных решеток, ступеней) радиальные и окружные ускорения вызываются как для газа, так и для частиц пыли практически одинаковыми градиентами статического давления (радиальным и поперечным, в искривленном межлопаточном канале). Соответственно, радиальные и окружные ускорения частиц пыли можно рассчитать через аналогичные ускорения частиц газа, используя соотношение их плотностей.

Поэтому можно рассчитать окружные составляющие окружных скоростей частиц в относительном и абсолютном движении. Если считать, что осевые скорости газа и частиц пыли одинаковы, это позволяет в любой точке проточной части определить вектор скорости частиц, выявить под каким углом, с какой частотой и с каким импульсом они бомбардируют различные участки пера лопатки (преимущественно переднюю кромку и выходной участок корыта), т. е. степень фреттинга. Эти же соображения позволяют выявить траектории частиц пыли в меридиональном сечении, т. е. выявить перераспределение зоны запыления по высоте ПЧ.

Рассмотрим движение частиц в радиальном направлении. Центробежное ускорение будет определяться выражением:

$$\frac{dc_r}{dt} = \frac{c_{уч}^2}{r}, \quad (1)$$

где  $c_{уч}$  – окружная скорость частицы пыли.

*Примечание.* В статье все параметры, обозначенные индексом «уч», относятся к частице пыли.

Центробежное ускорение задает градиент давления  $\frac{dP}{dr} = \rho \frac{dc_u}{dt}$ . Это выражение справедливо для частиц с круговым движением. Однако у частиц пыли в двухфазном потоке движение не круговое, они уходят к периферии с ускорением

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_u}\right) \frac{c_{уч}^2}{r} = \frac{d^2 r_{ч}}{dt^2} = \frac{d^2 r_{ч}}{dS^2} c_a^2, \quad (2)$$

так как  $dt = \frac{dS}{c_a}$ .

В выражении (2) считаем, что  $c_{ач} \approx c_a$ .

Принимая радиальную скорость на входе в первое рабочее колесо  $c_{r0} \approx 0$ , выразим радиальную скорость частицы в любой точке  $S$ .

$$c_{rч} = c_{r_0} + \int_0^S \left( \frac{d^2 r_{ч}}{dS^2} c_a^2 \right) dS = c_{r_0} + \int_0^S \left[ \left(1 - \frac{\rho}{\rho_u}\right) \frac{c_{уч}^2}{r} \cdot c_a^2 \right] dS. \quad (3)$$

При движении частиц пыли в многоступенчатом осевом компрессоре необходимо рассматривать частицу пыли на входе в первое рабочее колесо, идущую по втулке, затем в последующих рабочих колесах и направляющих аппаратах по корыту. Данное представление можно описать с помощью следующего выражения

$$r(S) = r_{BT} + \int_0^S c_{r0} dS + \int_0^S \left[ \int_0^S \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \right) \frac{c_{\text{уч}}^2}{r} c_a^2 dS \right] dS, \quad (4)$$

так как  $c_{\text{уч}} = \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \right) c_a = u \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \right) (1 - \text{tg}\beta_{1r} \bar{c}_a)$

и  $c_u = \frac{dx}{dS} c_a = u - \frac{dx}{dS} c_a = u(1 - \text{tg}\beta_{1r} \bar{c}_a)$ , то подставляя эти выражения в (4), получим

$$r(S) = r_{BT} + \int_0^S c_{r0} dS + \int_0^S \left[ \int_0^S u^4 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \right)^2 \frac{(1 - \text{tg}\beta_{1r} \bar{c}_a)^4}{r} c_a^2 dS \right] dS. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что износ лопаток по мере удаления частиц от входа будет увеличиваться к периферии. Это произойдет в силу сепарирующего эффекта в компрессоре, при котором концентрация частиц будет постепенно увеличиваться к периферии пера лопатки. При этом износ первых лопаток и износ корневого сечения последних ступеней будет практически отсутствовать. Эти соображения подтверждаются реальными данными, полученными в процессе разборки установки ГСВ-95 [1, 3, 4].

При проведении расчетов газодинамические параметры 1-й ступени получены из термогазодинамического расчета установки:  $c_{1u} = 98,77$  м/с,  $u = 347$  м/с,  $c_a = 190$  м/с,  $w_{1u} = 248,19$  м/с,  $\beta_1 = 37,4^\circ$ .

Геометрические параметры компрессора получены из чертежа данного двигателя [3].

Установка ГСВ-95, как было уже выше сказано, эксплуатировалась в районе полупустынь.

В таблице приведены типичные средние значения для различных регионов [4]. Наибольшая концентрация пыли наблюдается в районах пустынь и полупустынь и может достигать очень высоких уровней.

Район	Концентрация частиц, мг/м <sup>3</sup>	Диапазон размера частиц, мкм
Жилые районы	0,01 – 0,1	0,01 – 5
Пригородные районы	0,01 – 0,2	0,01 – 10
Районы легкой промышленности	0,05 – 0,3	0,01 – 5
Районы тяжелой промышленности	0,1 – 1	0,01 – 30
Прибрежные районы	0,01 – 0,5	0,01 – 10
Районы пустынь и полупустынь	500	0,1 – 100
Арктические районы	0,01 – 0,5	0,01 – 5
Тропические зоны	0,01 – 0,5	0,01 – 10

Распределение частиц по размерам и концентрации частиц является наиболее важным параметром, характеризующим загрязнение воздуха.

Чтобы определить концентрацию пыли, измеряется содержание пыли в кубическом метре воздуха. Концентрация пыли существенным образом зависит от географических и временных факторов.

Плотность частиц пыли может быть оценена по силе ветра (восходящих потоков), при котором держится пыль:

$$\frac{\pi d^2}{4} c_x \rho \frac{v_y}{2} = (\rho_{\text{ч}} - \rho) \frac{\pi d^3}{8} g,$$

тогда

$$\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} = \frac{c_x v_y^2}{dg} + 1. \quad (6)$$

Принимая концентрацию частиц  $c_x = 500$  мг/м<sup>3</sup> (таблица), диаметр частиц  $d_{\text{ч}} = 0,1$  мкм (таблица) и скорость ветра  $v_y = 0,5$  м/с, рассчитаем отношение  $\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho}$ :

$$\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} = \frac{c_x v_y^2}{dg} + 1 = 1 + \frac{0,5 \cdot 0,25}{0,0001 \cdot 9,81} = 128,421.$$

Подставляя значение  $\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho}$  при известном значении  $c_u$  в выражение  $c_{\text{уч}} = c_u \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \right)$ , получим значение  $c_{\text{уч}}$ .

$$c_{\text{уч}} = c_u \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \right) = 98,77 \cdot (1 - 0,0078) = 98 \text{ м/с}.$$

По уравнению (6) можно судить о том, что чем больше концентрация пыли на входе, тем с большей частотой происходит бомбардировка поверхностей лопаток. Из [1] следует, что скорость эрозии пропорциональна скорости частиц.

Из предыдущего расчета видно, что скорость частиц (в относительном и абсолютном движении) мало отличается от скоростей газа в проточной части (ПЧ). Это означает, что чем больше концентрация пыли и чем выше относительные скорости, тем быстрее изнашивается лопатка. Сама же концентрация пыли, как мы видим, различается по высоте ПЧ, и эта неравномерность увеличивается вдоль ПЧ.

Используя известные данные ГСВ-95, была построена (расчетным путем) нижняя граница пылевой зоны по высоте ПЧ (проточной части). Видно, что по мере удаления частиц от входа (рис. 2) нижняя граница зоны запыленности удаляется от втулки. Внутри этой зоны концентрация частиц неравномерна – она нарастает от

нижней границы к периферии. В первом приближении можно считать, что эта эпюра линейна (изображает собой треугольник с основанием на периферии ПЧ). При этом интеграл распределения по высоте ПЧ, изображающий расход пыли, должен сохраняться.

Кроме того, эпюра распределения концентрации пыли по высоте ПЧ хорошо видна по изменению выходных кромок лопаток статора (направляющих аппаратов) [3]. Сопоставив полученные результаты, включая построенную нижнюю границу распределения пыли в ПЧ компрессора (рис. 2) и экспериментальные данные [3], можно сделать вывод, что согласование удовлетворительное.

Например, относительная окружная скорость частиц определится как

$$w_{u\text{ч}} = w_u + c_u \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) = w_u + c_{u\text{ч}},$$

$$w_{u\text{ч}} = w_u + c_u \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) =$$

$$= 248,19 + 98,77(1 - 0,0078) = 346,2 \text{ м.} \quad (7)$$

Угол, с которым частицы пыли ударяются о поверхность лопатки, можно определить из выражения:

$$\text{ctg } \beta_{\text{ч}} \cdot \bar{c}_a = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) \cdot \text{ctg } \beta \cdot \bar{c}_a,$$

тогда

$$\text{ctg } \beta_{\text{ч}} = \left(\left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) \cdot \text{ctg } \beta \cdot \bar{c}_a\right) / \bar{c}_a =$$

$$= (0,9922 + 0,9922 \cdot \text{ctg } 37,4 \cdot 0,548) / 0,548 = 0,9922,$$

$$\beta_{\text{ч}} = 30,6^\circ.$$

Относительная скорость частиц при ударе

$$w_{\text{ч}} = \frac{c_a}{\sin \beta_{\text{ч}}} = \frac{190}{\sin 30,6} = 373 \text{ м/с.}$$

Величина нормали к скорости  $w_{\text{ч}}$

$$w_n = w_{\text{ч}} \cdot \sin(\beta - \beta_{\text{ч}}) =$$

$$= 373 \cdot \sin(37,4 - 30,6) = 44,16 \text{ м/с.}$$

Рассчитанные выше скорости относятся к корытцу лопатки, скорости и траектории частиц по корыту, спинке и средней линии («ядра») различны. Величина  $w_n$  дает распределение феттинга (уноса материала), при этом она пропорциональна значению  $w_u^2$ . Унос материала по спинке будет стремиться к нулю, а в средней части корыта – к минимальному.

Частицы с одной скоростью ударяются о поверхность лопатки и с другой уже скоростью отскакивают. Сведения, приведенные в различных источниках, показывают, что при ударе всегда теряется одна и та же величина скорости, равная примерно 0,81 – 0,85.

То есть скорость частицы  $w_{\text{ч}2}$  после удара о лопатку в относительном движении можно определить как

$$w_{\text{ч}2} = (0,81 \dots 0,85) \cdot w_{\text{ч}} =$$

$$= (0,81 \dots 0,85) \cdot 373 = (302,13 \dots 317,05).$$

Ниже приведена схема построения траектории частиц в межлопаточном канале осевой ступени компрессора (рис. 3, 4).

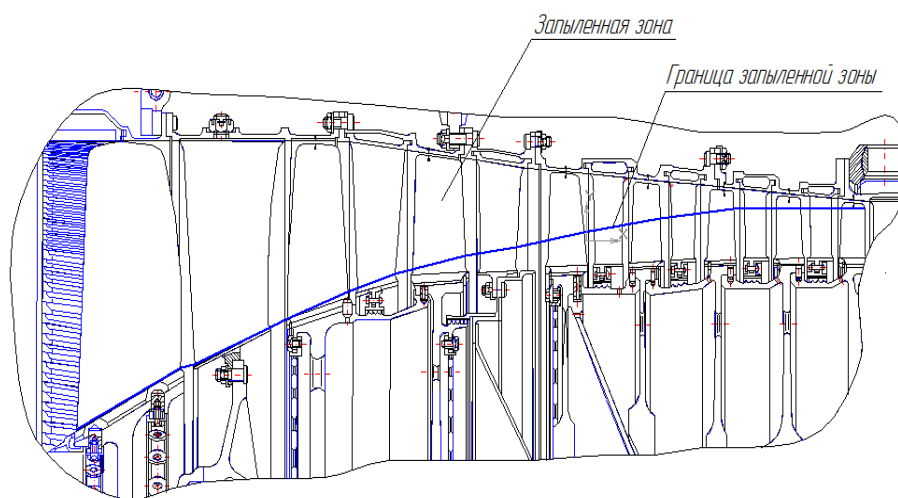


Рис. 2. Определение границы запыленной зоны в компрессоре ГСВ-95 в проточной части

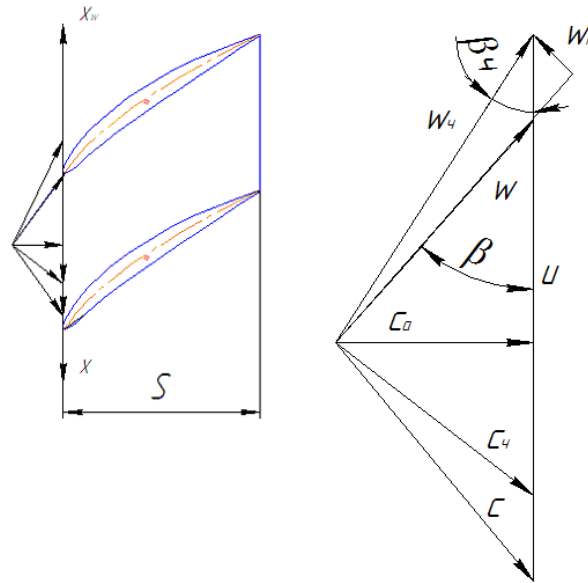


Рис. 3. Схема треугольников скоростей движения частицы пыли и воздуха в межлопаточном канале

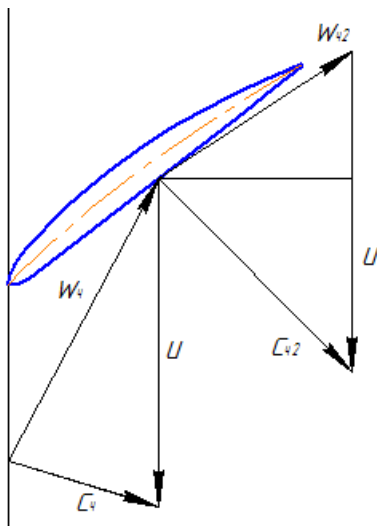


Рис. 4. Схема для построения траектории частиц

У лопаток рабочего колеса величина лопаток больше, чем у лопаток направляющего аппарата. Такое явление может быть объяснено тем, что скорость частиц при ударе о рабочую лопатку значительно больше, чем скорость удара о направляющий аппарат.

Зная распределение  $\bar{c}_a(c_a)$ , можно определить отношение  $\frac{dx_w}{dS}$ , которое в дальнейшем

позволит определить  $\frac{dx_{wч}}{dS}$  по формуле:

$$\frac{dx_{wч}}{dS} c_a = u \left(1 - \frac{\rho}{\rho_q}\right) + \frac{\rho}{\rho_q} \frac{dx_w}{dS} c_a. \quad (8)$$

Поделив выше приведенное уравнение на окружную скорость  $u$ , получим

$$\frac{dx_{wч}}{dS} \bar{c}_a = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_q}\right) + \frac{\rho}{\rho_q} \frac{dx_w}{dS} \bar{c}_a. \quad (9)$$

Вдоль любой траектории  $dL = \frac{F}{m} dx = F_{mu} dx$ ,

где  $F_{mu}$  – ударная сила в окружном направлении,  $m$  – масса частицы газа.

$$\frac{dL}{dS} = F_{mu} \frac{dX}{dS}; F_{mu} = \frac{dL/dS}{dX/dS} = u^2 \bar{c}_a \frac{(d^2 X / dS^2)}{(dX/dS)};$$

$$\frac{F_{mu}}{u^2 \bar{c}_a} \cdot X = \frac{dX}{dS},$$

тогда  $X = e^{\left(\frac{F_{mu}(S)}{u^2 \bar{c}_a}\right)} - 1$ .

Если есть желаемое значение  $F_{mu}(S)$ , то решение дает требуемое  $e$  – закон профилирования, где  $X_w$  – это координата профиля в РК.

На величину износа влияют различные факторы (размеры частиц, скорости, материал, продолжительность работы и т. д.). Величина наработки влияет также на траектории движения частиц, это связано с тем, что по мере эксплуатации величина эрозии увеличивается, меняются геометрические параметры решеток.

Изменение абсолютной окружной скорости можно определить как

$$\frac{dc_{uч}}{dt} = \frac{\rho}{\rho_q} \frac{dc_u}{dt} = -\frac{\rho}{\rho_q} c_a^2 \frac{dx_w^2}{dS},$$

тогда

$$c_{u\text{ч}} = c_{u\text{ч}}|_{t=0} + \int_0^t \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \frac{dc_u}{dt} \cdot dt =$$

$$= c_{u\text{ч}}|_0 + (-c_a^2) \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \int_0^S \frac{d^2 x_w}{dS^2} dS,$$

но  $c_u = c_u|_0 + (-c_a^2) \int_0^S \frac{d^2 x_w}{dS^2} dS$ , тогда

$$c_{u\text{ч}} = c_u|_0 + \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \int_0^t \frac{dc_u}{dt} \cdot dt = c_u|_0 + \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \int_0^S \frac{dc_u}{dS} \cdot dS.$$

Приведенные выше соображения также подтверждаются и методом трехмерного CAD / CAE-моделирования [3, 5].

Сопоставление полученных результатов с результатами дефектации ГСВ-95 и обмера подвергшихся эрозии лопаток после работы в условиях существенной запыленности показало их хорошую сходимость.

### ВЫВОД

Изложенные в статье материалы о траекториях частиц пыли в межлопаточном канале осевого компрессора позволяют анализировать и на этапе проектирования прогнозировать картину износа лопаток любой формы и определять наиболее подверженные эрозии участки конкретных профилей и пера лопаток. При этом рабочие и направляющие лопатки первых ступеней подвергаются эрозии по всей высоте (в большей степени со стороны корыта, вблизи передней и задней кромок), тогда как рабочие лопатки последних ступеней имеют ярко выраженное нарастание эрозии по мере приближения к концевому сечению (к периферии), что обусловлено центрифугированием пыли в ступенях. В связи с этим увеличивается концентрация пыли на периферии и лопатки последних ступеней, являющиеся наиболее тонкими, становятся наиболее изнашиваемым элементом двигателя.

Обмеры лопаток после эрозии в лаборатории ООО НВП «ОПТЭЛ» УГАТУ показывают, что картина износа подтверждает приведенные выше соображения о траектории движения частиц.

Выявленные закономерности движения частиц пыли в проточной части компрессоров ГТД, особенности эрозии, изменения геометрии лопаток и изменения параметров и характеристик двигателей позволяют учесть условия эксплуатации при проектировании двигателя, разработать меры по защите лопаток от эрозии и средства параметрической диагностики ГТД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Шальман Ю. И.** Износ и изменение параметров осевой и центробежной ступеней при работе на запыленном воздухе // Вертолетные газотурбинные двигатели: сб. ст. М.: Машиностроение, 1966.
2. Изменение геометрических параметров профилей лопаток компрессора осевых компрессоров турбовальных ГТД в процессе эксплуатации / Ф. П. Ходеев [и др.] // Авиационная промышленность. 1995. № 3–4. С. 38–41.
3. Использование закономерностей протекания характеристик компрессора при параметрической диагностике технического состояния ГТД / С. А. Струговец [и др.] // Молодой ученый. Т. 1, № 1–2 (13). С. 59–66.
4. **Hamed A., Tabakoff W.** Experimental and Numerical Simulation of Ingested Particles in Gas Turbine Engines // AGARD (NATO) 83<sup>rd</sup> Symposium of Propulsion and Energetics Panel on Turbines, Rotterdam, The Netherlands, April 25–28. 1994
5. **Tabakoff W.** High-Temperature Erosion Resistance Coatings for Use in Turbomachinery // Wear 186–187. 1994. P. 224–229.
6. **Tabakoff W., Hamed A., Wenglarz R.** Particulate Flows, Turbomachinery Erosion and Performance Deterioration // Von Karman Lecture Series 1988–1989, May 24–27, Brussels, Belgium.
7. **Кашеев В. Н.** Разрушение поверхности металла в зависимости от удара абразивной частицы // ЖТФ. 1995. Т. XXV, вып. 13.
8. **Билик Ш. М.** Абразивно-жидкостная обработка. Машгиз, 1960.
9. **Терещенко В. Г.** Определение параметров соударения абразивных частиц с поверхностями лопаток вентиляторов // Сб. науч. тр. СевКавГТУ. Серия «Естественно-научная». 2005. № 1.

### ОБ АВТОРАХ

**Кривошеев Игорь Александрович**, декан факультета авиац. двиг., проф., науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1976). Канд. техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (по управлению РДТТ, 1981). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (по САПР АД, 2000). Иссл. в обл. инф. технологий в двигателестроении.

**Камаева Регина Филгатовна**, асп. каф. авиац. двиг. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. параметрической диагностики состояния ГТД.

**Струговец Сергей Анатольевич**, зам. гл. констр. ФГУП «УАП Гидравлика». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1981). Иссл. в обл. конвертирования ГТД, малоразмерных ВСУ и ГТУ.