

С. А. СТРУГОВЕЦ, И. А. КРИВОШЕЕВ, Р. М. ГАЛИУЛИН, Р. Ф. КАМАЕВА, К. Е. РОЖКОВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭРОЗИИ ЛОПАТОК И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОТЕКАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРА

Приводятся результаты, полученные при эксплуатации в полевых условиях передвижной газотурбинной компрессорной установки, дефектации и обмере лопаток после эрозии в лаборатории ООО НВП «ОПТЭЛ» УГАТУ. Предложен метод диагностики технического состояния ГТД на основе анализа влияния дефекта на дрейф характеристик компрессора. Контроль и выявление этого дрейфа предложено производить по тренду базовых параметров («образмеривания»), выявлять и хранить соответствующие граничные поверхности в пространстве этих параметров. При диагностике используется разработанный авторами метод идентификации моделей ГТД и характеристик узлов. *Турбокомпрессор; эрозия лопаток; параметрическая диагностика; идентификация; характеристики ступеней и компрессоров*

Уникальные результаты, важные для разработки средств параметрической диагностики технического состояния ГТД, получены первым из авторов (Струговцом С. А.) при эксплуатации в полевых условиях созданной им передвижной компрессорной установки УКП-5 с генератором сжатого воздуха ГСВ-95 на базе авиационного ГТД Р95Ш. Как видно из рис. 1, ГСВ-95 выполнен по достаточно простой схеме: сопло базового двигателя раскрыто, отбор сжатого воздуха организован за КВД с помощью улитки с компенсатором.

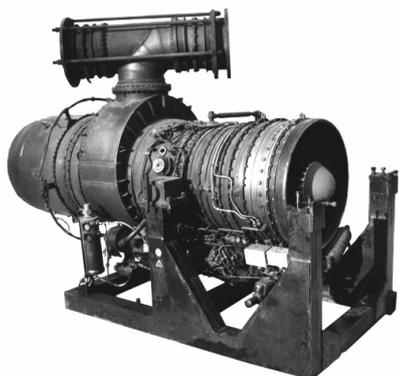


Рис. 1. Генератор сжатого воздуха ГСВ-95

Установка УКП-5 предназначена для проудки магистральных трубопроводов. Летом и осенью 2000 года 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 пылезащитным входным устройством. Несмотря на принимавшиеся меры, такие как увлажнение грунта рядом с установкой и укладка защитного нетканого материала под входное устройство (рис. 2), 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 приблизительно на 8% скольжения роторов. Таким образом, за счет двухвальной схемы Р95Ш, компрессор до последнего предела сохранял устойчивость, компенсируя эрозию лопаток КВД раскруткой РВД. Разработчик УКП-5 Струговец С. А., руководивший ее эксплуатацией, передал ГСВ-95 вместе с протоколами хронометража для дефектации в НПП «Мотор», где была произведена разборка двигателя. После разборки двигателя визуально установлена значительная эрозия лопаток как рабочих колес, так и направляющих аппаратов компрессора. Было произведено сравнение новой лопатки и лопатки снятой с двигателя и обнаружено, что на рабочих лопатках первых двух ступеней компрессора низкого давления (КНД) эрозия практически отсутствует, а на рабочих лопатках 3–8 имеется значительный унос материала в периферийной части, возрастающий по мере уменьшения размеров лопаток.



Рис. 2. УКП-5 подготавливается к запуску в районе Черноземельского канала, Республика Калмыкия. Экипаж установки защищает от пыли входное устройство

Толщина входной и выходной кромок лопаток напоминала лезвие бритвы. На последней ступени на периферии хорда уменьшилась практически до нуля. На рис. 3 показаны статорные лопатки. Унос материала лопаток направляющего аппарата имеет минимальную величину на некотором удалении от периферии.

Унос материала лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата на периферии значительно больше, чем в корневом сечении лопаток. Это объясняется характером траекторий движения частиц двухфазного потока в компрессоре, когда большая часть газа и тем более плотных твердых абразивных частиц движется ближе к периферии, это особенно проявляется в зоне рабочих колес, где скорость потока в относительном движении выше (от чего унос материала рабочих лопаток выше, чем статорных). В направляющем аппарате в пристеночном слое уменьшается скорость воздуха (и частиц), поэтому эрозия меньше. Кривизна траекторий частиц меньше, чем газа, поэтому унос материала лопаток больше в зоне передних кромок (в т. ч. в начале спинки) и в зоне корыта на выходе.

По предложению Кривошеева И. А. и при содействии руководителя ООО НВП «ОПТЭЛ» УГАТУ Галиулина Р. М., подвергшиеся эрозии лопатки были проконтролированы с использованием лазерного сканирования на аппаратно-программном комплексе «ОПТЭЛ-ТЛ» для высокопроизводительного контроля геометрических параметров изделий сложной формы [5, 6]. Результаты измерений и их компьютерной обработки в ООО НВП «ОПТЭЛ» представлены в виде трехмерных (3D) (рис. 4) и двухмерных (2D) профилограмм лопатки в нескольких сечениях по высоте пера лопатки (рис. 5).

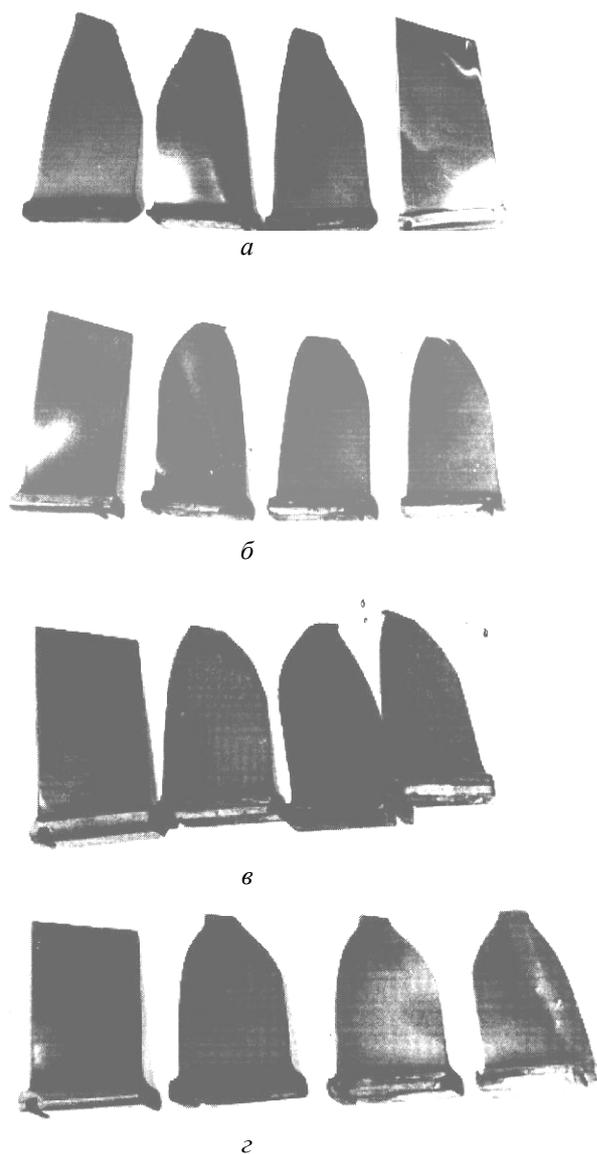


Рис. 3. Рабочие лопатки ступеней КВД в процессе дефектации: *a* – II ступень; *б* – III ступень; *в* – IV ступень; *z* – V ступень

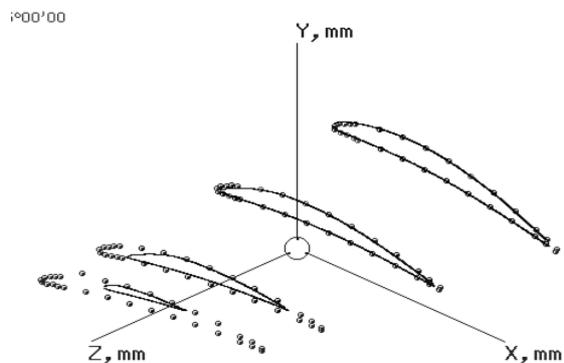


Рис. 4. Трехмерное отображение результатов измерений профиля лопатки (в сравнении с точками исходной 3D-модели лопатки)

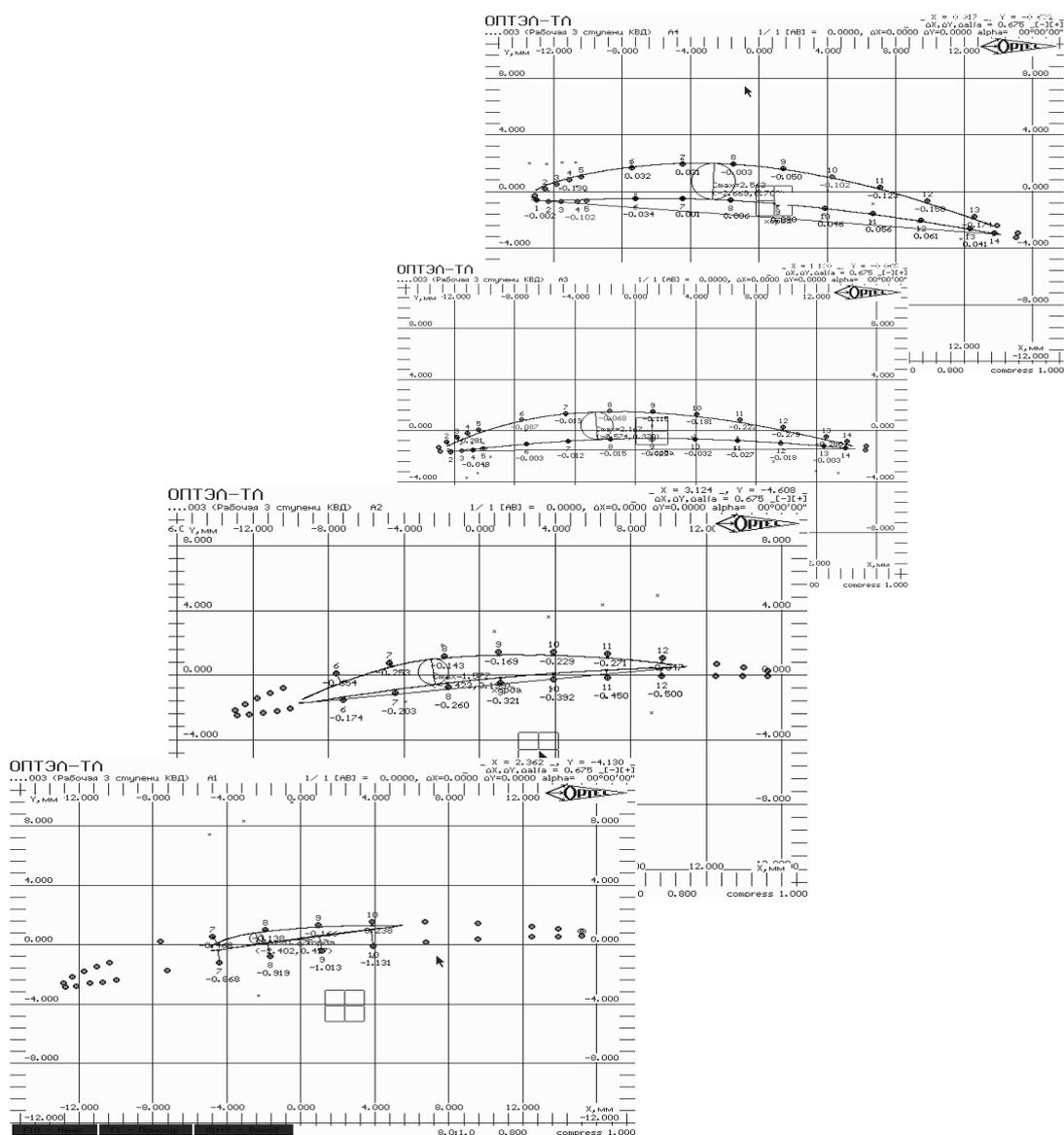


Рис. 5. Двухмерные профилограммы пера лопатки в различных поперечных сечениях лопатки (в сравнении с точками исходной геометрии профилей)

На основе этих измерений, произведенных в ООО НВП «ОПТЭЛ», получены 3D-модели лопаток в различных фазах в процессе эрозии и произведена оценка изменения геометрических параметров лопаток, позволяющая выявить закономерности уноса материалов по мере наработки на разных ступенях, на рабочих и статорных лопатках, по высоте проточной части и на разных участках профиля (передняя, задняя, верхняя кромки, корыто, спинка, их передняя, средняя, задняя части) [1].

В настоящее время авторы в рамках НИЛ САПР-Д УГАТУ с использованием разработанной системы имитационного моделирования (СИМ) DWIG и предложенной методики идентификации моделей двигателя по зафиксиро-

ванным Струговцом С. А. трендам параметров ГСВ-95 ведут расчеты по выявлению соответствующего тренда параметров образмеривания характеристик КНД и КВД от характерного параметра эрозии Δ (для этого предложено использовать унос материала вдоль средней линии профиля по передней кромке в концевом сечении I ступени) [2, 3, 4]. При этом весьма полезными оказались развиваемые в НИЛ САПР-Д под руководством Кривошеева И. А. новые методы расчета характеристик элементарных ступеней и далее компрессоров в целом. Это позволило связать изменение геометрии лопаток при эрозии и загрязнении с трендом характеристик КНД и КВД. Вместе с разработанным Кривошеевым И. А. методом идентификации имита-

ционных моделей (ИМ) это позволило сформировать эффективный метод параметрической диагностики ГТД [2] (рис. 6).

В настоящее время на основе этого метода разрабатываются средства диагностики загрязнения и эрозии лопаток ГТП АЛ-31СТ, выпускаемого в ОАО «УМПО». Эти средства базируются на использовании разработанной в НИЛ САПР-Д СИМ DVIG и вновь создаваемой СИМ КОМПРЕССОР.

В связи с разработкой системы имитационного моделирования компрессоров (СИМ КОМПРЕССОР), авторами проведен анализ экспериментальных данных, различных эмпирических и теоретических зависимостей, выведен ряд собственных и предложена соответствующая методика. По этой методике был произведен расчет и построена упрощенная характеристика первой ступени КНД АЛ-31СТ (рис. 7).

Для отработки методики диагностики важны установленные факты отказов, когда была произведена последующая дефектация и установлены причины отказа. Так, например, в работе были использованы сведения об одном из экземпляров ГТП АЛ-31СТ, эксплуатирова-

вшемся на газокomppressorной станции «Москово», который после аварии (помпажа) был доставлен в ОАО «УМПО», где была произведена разборка двигателя в заводских условиях. В протоколе дефектации указано, что на лопатках КНД первой ступени (и в меньшей степени – других ступеней) зафиксированы отложения липкой грязи. В ряде других протоколов аварийных трендов, получаемых в ОАО «УМПО» с КС, где эксплуатируются ГТП АЛ-31СТ, указывается, что загрязнение лопаток КНД и КВД (по передней кромке) достигает 1 мм. Для выявления влияния эрозии и загрязнения ПЧ на характеристику 1ст КВД и на характеристику КВД в целом аналогично тому, как это показано выше, построены характеристики ступени с загрязненными рабочими и направляющими лопатками. При этом распределение уноса материала и, наоборот, налипания по поверхности профиля принято подобным тому, как это было выявлено и показано выше (после дефектации в НПП Мотор) путем обмеров в лаборатории фирмы ОООНВП «ОПТЭЛ» УГАТУ на лопатках турбокомпрессора ГСВ-95, выполненного на базе двигателя Р-95Ш.

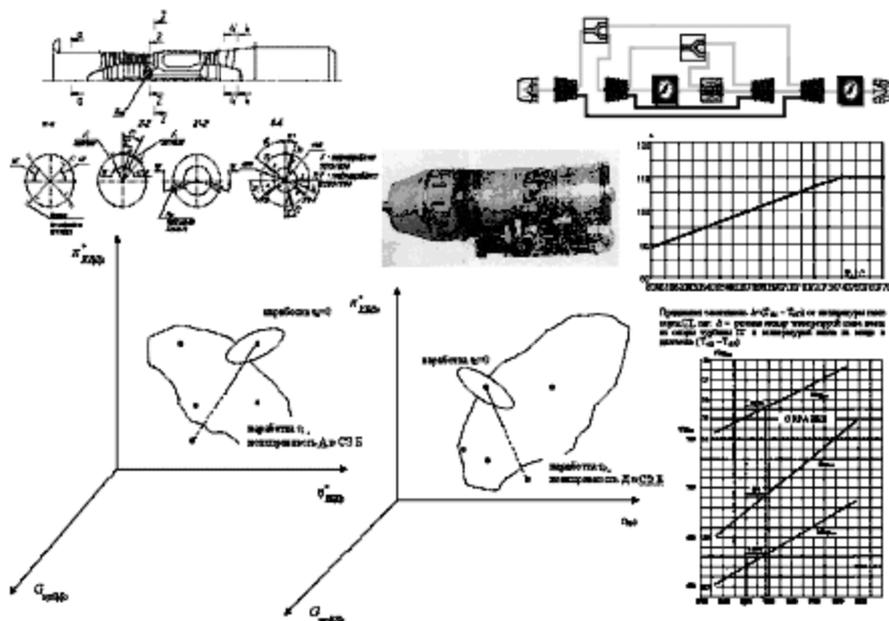


Рис. 6. Условная схема предложенного метода параметрической диагностики на основе идентификации модели, выявления тренда базовых параметров («образмеривания») характеристик узлов по результатам контроля параметров ГТД в эксплуатации

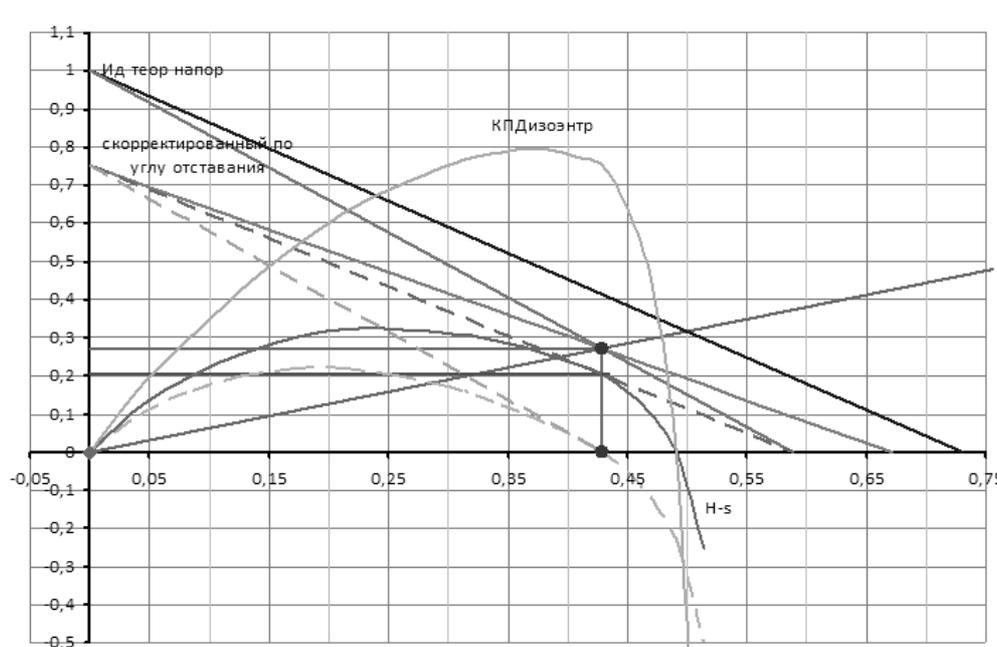


Рис. 7. Построение упрощенной характеристики 1 ст КВД $\bar{H}_T = f(\bar{c}_a)$, $\bar{H}_S = f(\bar{c}_a)$ и $\eta_K^* = f(\bar{c}_a)$ по исходной геометрии решеток, на основе предложенного авторами метода и эмпирических (обобщенных) зависимостей Ольштейна Н. Е. и Хауэлла

Поскольку, как указано выше, из протоколов с компрессорных станций (КС), где используется АЛ-31СТ, следует, что на входной и выходной кромках максимальная толщина загрязнения достигает 1 мм, то именно для этого случая, после построения загрязненного профиля, определены измененные лопаточные углы на входе и на выходе, а также измененная хорда профиля.

В результате использования экспериментальных данных и предложенной методики выявлено, как изменяются основные параметры и характеристики 1 ступени, компрессора и двигателя в целом по мере накопления дефекта (рис. 8, 9, 10, таблица).

При этом в первом приближении полагается, что характеристика каскада деформируется в том же направлении и в той же степени, что и характеристика первой ступени. Более точно по предложенной методике ведется анализ деформации характеристики каждой ступени и на этом основании делается вывод о деформации характеристики каскада в целом. Результаты расчета представлены в таблице.

Из рис. 9 и 10 и таблицы видно, что загрязнение лопаток вызывает уменьшение напора и снижение КПД. Полученные данные позволяют найти зависимость параметров в точке образмеривания характеристики ступени и в точке образмеривания характеристики КВД от величины накопления дефекта – в данном

примере это загрязнение ПЧ (аналогично для эрозии).

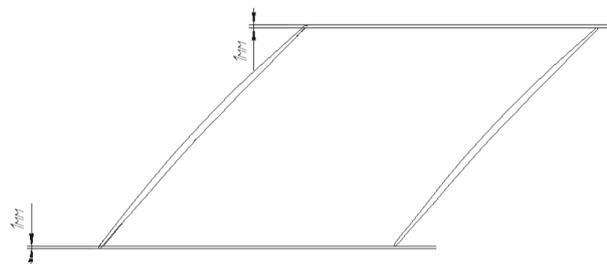


Рис. 8. Решетка профилей рабочих лопаток 1ст. КВД АЛ-31СТ

В свою очередь, в составе ИМ ГТД (например в СИМ DVIG) это позволяет организовать диагностику состояния ГТД, определить необходимость промывки, анализируя дрейф характеристики, в т. ч. границы помпажа, определить возможность помпажа (запас), построить соответствующие «уставки» для руководства по эксплуатации (РЭ60) АЛ-31СТ, ввести дополнительные ограничения в закон управления САУ и Р АЛ-31СТ.

В основе метода лежит предложенный способ контроля тренда базовых параметров («образмеривания»), представленных в определенном виде характеристик узлов ГТД. При этом предварительный анализ влияния накопления дефекта позволяет ввести соответствующие граничные поверхности в пространство базовых параметров (рис. 11).

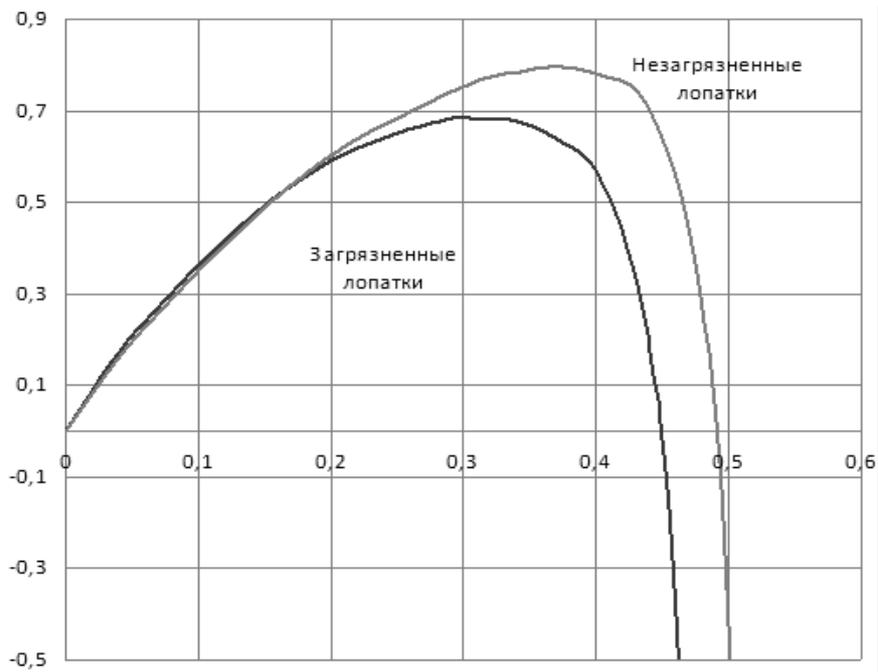


Рис. 9. Сравнение КПД загрязненных и незагрязненных лопаток $\eta_K^* = f(\bar{\alpha}_a)$

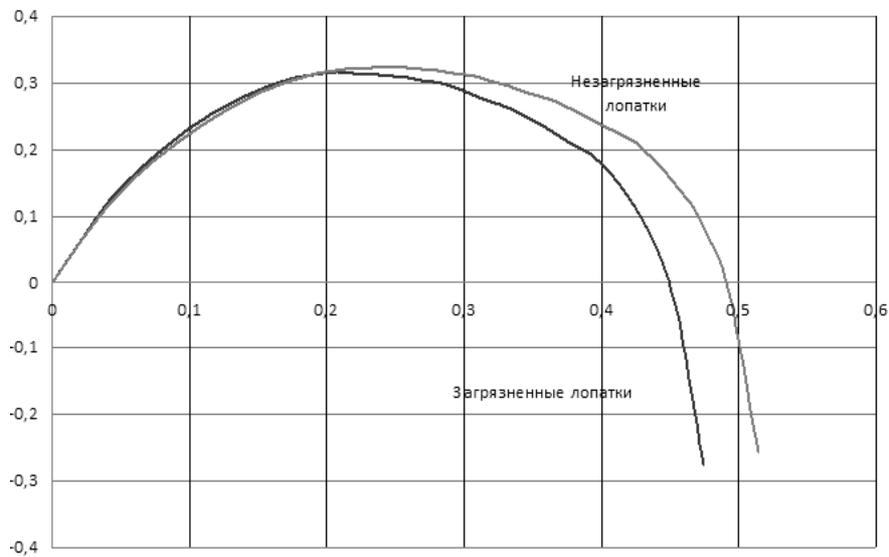


Рис. 10. Сравнение изоэнтропических напоров загрязненных и незагрязненных лопаток $H_S = f(\bar{\alpha}_a)$

Сравнительная таблица параметров компрессора

| № | Параметр | Исходная лопатка | Загрязненная лопатка |
|----|---------------------|------------------|----------------------|
| 1 | $\beta_{1л}$ | 41,47 | 39,56 |
| 2 | $\beta_{2л}$ | 52,13 | 50,39 |
| 3 | θ | 10,66 | 10,83 |
| 4 | β_{10} | 32,99 | 31,78 |
| 5 | β_{20} | 45,98 | 44,33 |
| 6 | b/t | 1,1 | 1,05 |
| 7 | δ | 6,15 | 6,06 |
| 8 | i | 8,48 | 7,78 |
| 9 | $\overline{c_a}$ | 0,4489 | 0,4146 |
| 10 | \overline{H}_{T0} | 0,26 | 0,256 |
| 11 | \overline{H}_{S0} | 0,19 | 0,17 |
| 12 | η_0 | 0,76 | 0,56 |
| 13 | $\eta_{опт}$ | 0,79 | 0,68 |
| 14 | u , м/с | 326,5 | 326,5 |
| 15 | c_1 , м/с | 174,5 | 172 |
| 16 | w , м/с | 269,24 | 269,24 |
| 17 | c_{1a} , м/с | 178 | 141,8 |
| 18 | λ_{1a} | 0,574 | 0,46 |
| 19 | G_B , кг/с | 64,39 | 54,37 |
| 20 | H_S , кДж/К | 1750 | 992 |
| 21 | π_K^* | 1,4 | 1,37 |



Рис. 11. Схема получения граничных поверхностей в пространстве базовых параметров («образмеривания») характеристики КНД АЛ-31СТ для дальнейшего использования при диагностике эрозии, загрязнения, ухудшения состояния опор

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сведения, представленные Струговцом С. А., а также результаты лазерного сканирования лопаток с использованием аппаратно-программного комплекса «ОПТЭЛ-ТЛ» под руководством Галиулина Р. М., совместно с разработанными в НИЛ САПР-Д методом идентификации и методикой расчета характеристик компрессора, позволили сформировать эффективный метод параметрической диагностики ГТД. В настоящее время авторы (Кривошеев И. А., Камаева Р. Ф.) продолжают разработку предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акмалетдинов Р. Г.** Конвертированный авиационный двигатель как средство решения экологических проблем: дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук: спец. 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Уфа: УГАТУ, 2005. 155 с.

2. **Кривошеев И. А.** Методы и средства диагностики состояния технических систем на основе идентификации их имитационных моделей // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота. 2008. № 7 (14). С. 94–99.

3. **Кривошеев И. А., Кожин Д. Г., Иванова О.Н.** Решение задач идентификации, проектирования и управления с использованием сетевых имитационных моделей // Тр. междунар. науч.-техн. конф. по обратным задачам. 2004. С. 75–80.

4. **Кривошеев И. А., Иванова О. Н., Горюнов И. М.** Использование средств имитационного сетевого моделирования ГТД на этапе идентификации моделей по результатам испытаний // Вестник УГАТУ. Т. 6, № 1 (12). 2005. С. 65–75.

5. Optoelectronic computer-aided systems for inspection of GTE complex objects / R. M. Galiulin [et al.] // Proc. of 7th Intern. Symposium on Laser Metrology applied to Science, Industry and Everyday Life. 2002. Vol. 4900. Bellingham, USA, P. 178–184.

ОБ АВТОРАХ



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



Кривошеев Игорь Александрович, декан факультета АД, проф., науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (2000). Иссл. в обл. инф. техн. в двигателестроении.



Галиулин Равиль Масгутович, рук. лаб. ООО НВП «ОПТЭЛ». Дипл. радиоинженер (ТИАСУР, 1976). Канд. техн. наук по инф.-изм. технике (1981). Иссл. в обл. оптоэлектронных информационных средств контроля.



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



Рожков Кирилл Евгеньевич, асп. той же каф. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 2009), Иссл. в обл. моделирования рабочих процессов и анализа характеристик лопаточных машин.