

МАШИНОСТРОЕНИЕ • ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛА

УДК 621.452.3

И. А. КРИВОШЕЕВ, Р. Ф. КАМАЕВА, С. А. СТРУГОВЕЦ

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С ПОМОЩЬЮ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

В статье авторами предложено для диагностики состояния технической системы (ТС) использовать данные о деформации характеристик ТС и их структурных элементов (СЭ) в процессе эксплуатации. Предлагаемая методика на основе идентификации имитационной модели (ИМ) позволяет судить о закономерностях протекания характеристик узлов и элементов в процессе их эксплуатации, а также локализовать дефекты и отказы по их видам и элементам (где произошел или возможен отказ). Газотурбинный двигатель; *техническая система; имитационная модель; параметрическая диагностика; компрессор*

Обеспечение требуемой надежности двигателя в процессе эксплуатации привело к необходимости постоянного контроля состояния двигателя. Минимизация стоимости ЖЦ для заказчика, увеличение степени готовности и вероятности выполнения полетного задания и, тем самым, поддержание высокой безопасности в эксплуатации – ключевые цели реализации системы управления состоянием двигателя.

Если раньше двигатели снимались с эксплуатации по достижении запланированного числа полетов или наработки, то в настоящее время с развитием средств мониторинга состояния двигателей актуальным стал переход к эксплуатации по техническому состоянию. Большинство существующих методов диагностики основано на выявлении заметных изменений основных параметров двигателя, позволяющих определять повреждения в узлах двигателя. В общем случае физические повреждения связаны с такими явлениями, как попадание посторонних предметов, эрозия и коррозия лопаток, загрязнения, износ уплотнений, утечки и заклинивание в сопле, которые приводят к изменениям таких параметров двигателя, как КПД, производительность компрессора, площади сопла и т. д.

Применяющиеся на практике методы диагностики основаны на том, что контролируемые параметры двигателя приводятся к выбранному характерному режиму, и по их тренду принимается решение о состоянии двигателя в целом. Однако такая диагностика малодостоверна, так как она не позволяет локализовать дефекты и

отказы по их видам и элементам (где произошел или возможен отказ), а также судить о состоянии отдельных элементов в составе двигателя.

В отличие от существующих методов диагностики авторами предложена методология диагностики ТС на основе идентификации ИМ, позволяющей судить о закономерностях протекания характеристик узлов и элементов в процессе их эксплуатации.

**МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ТС
С ПОМОЩЬЮ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

В данной работе авторами для диагностики состояния ТС предложено использовать данные о деформации характеристик ТС и их СЭ в процессе эксплуатации [1]. Эти данные получаются на основе анализа тренда базовых значений параметров (параметров «образмеривания» безразмерных характеристик – среднестатистических, индивидуальных, полученных на предыдущих стадиях ЖЦ), определяющих масштаб характеристик СЭ и ТС вдоль осей в многомерном пространстве параметров ТС.

Согласно предложенному алгоритму (рис. 1), для каждого элемента выявляется конечный набор возможных дефектов. Анализ накопления каждого дефекта позволяет определить траекторию дрейфа базовой точки в пространстве «параметров образмеривания». С другой стороны, для традиционных методов диагностики на заводах задаются так называемые «уставки» (рис. 2) по ряду параметров (граничные линии на дроссельных, нагрузочных, климатических характеристиках).

Подставляя в модель при идентификации предельные параметры с учетом используемых

в настоящее время «уставок» и ограничений, назначаемых для отдельных параметров ТС, с использованием модели ТС в системе ИМ (СИМ) DVIgw (рис. 3) определяются соответствующие частные отклонения для параметров «образмеривания» характеристик СЭ, это позволяет получить положение граничных поверхностей в пространстве «параметров образмеривания» характеристик каждого СЭ, при этом каждая граничная поверхность соответствует конкретной неисправности конкретного СЭ (рис. 3).

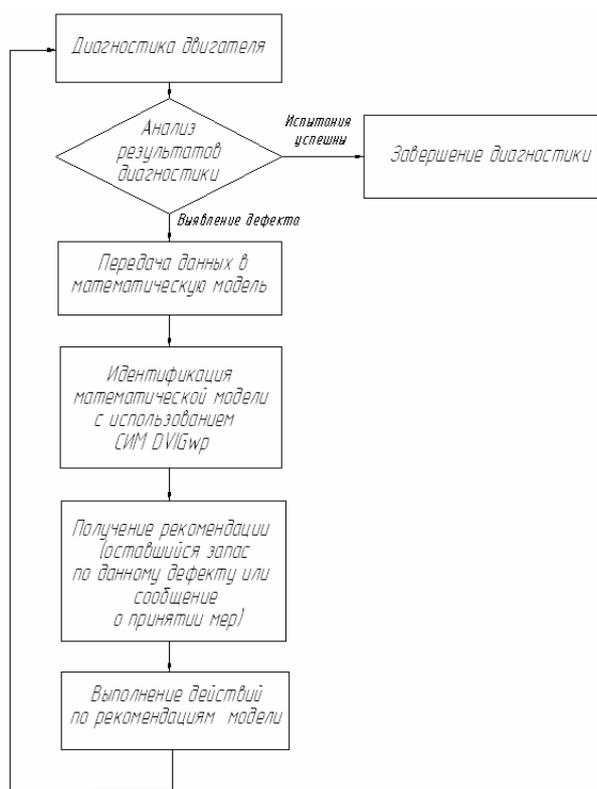


Рис. 1. Методика диагностики с использованием имитационной модели

В процессе идентификации определяется, ушла ли базовая точка в каком-либо СЭ за какую-либо граничную поверхность.

В зависимости от этого появляется сообщение о конкретной неисправности (отказе, необходимости принятия мер) в конкретном СЭ или информация о запасе по конкретному отказу в конкретном СЭ (рис. 4).

Разработанные методы идентификации ИМ (на примере различных ТС) по результатам испытаний и контроля параметров (в эксплуатации) опираются на предложенный оригинальный метод сетевого представления взаимосвязи

параметров в моделях элементов и в ИМ ТС в целом [2, 3].

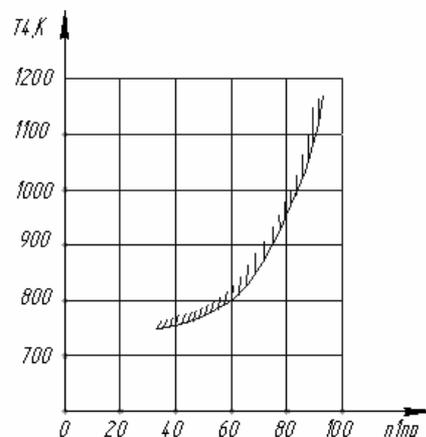
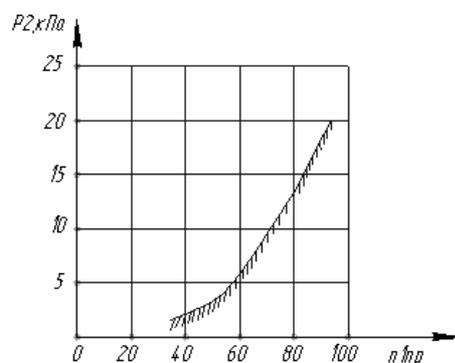
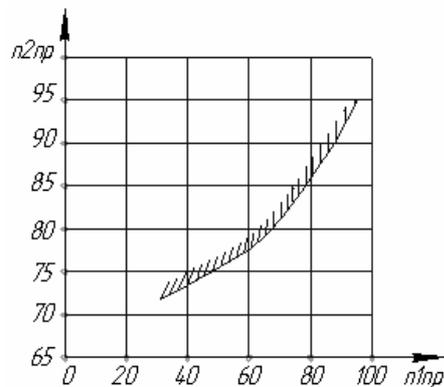


Рис. 2. Граничные линии («уставки») на дроссельных характеристиках двигателя

Ниже, в качестве примера, рассматриваются такие дефекты, как загрязнение проточной части (за счет налипания) и эрозия лопаток компрессора (на примере ГТД Р-95Ш).

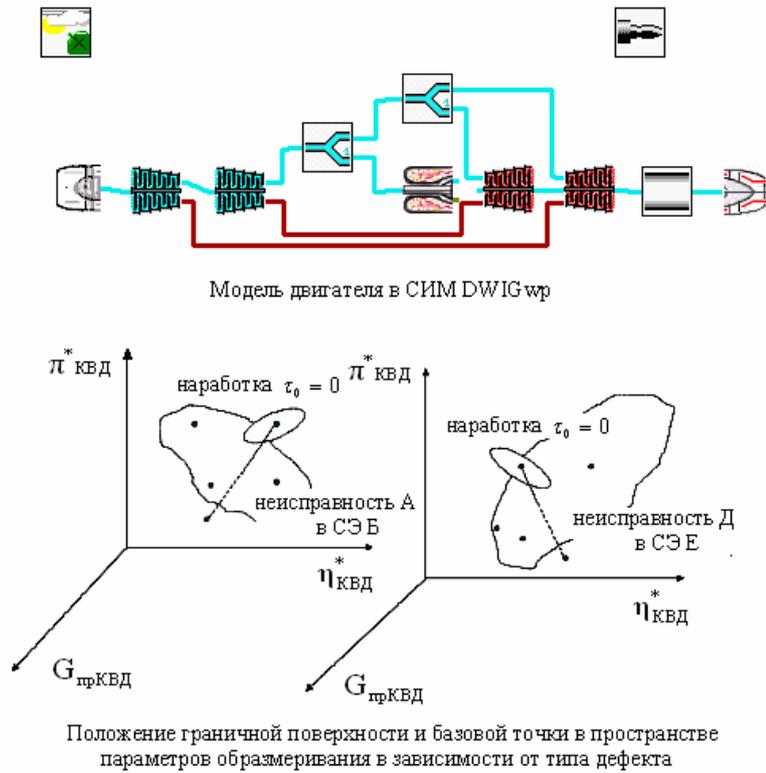


Рис. 3. Использование результатов идентификации для диагностики ТС

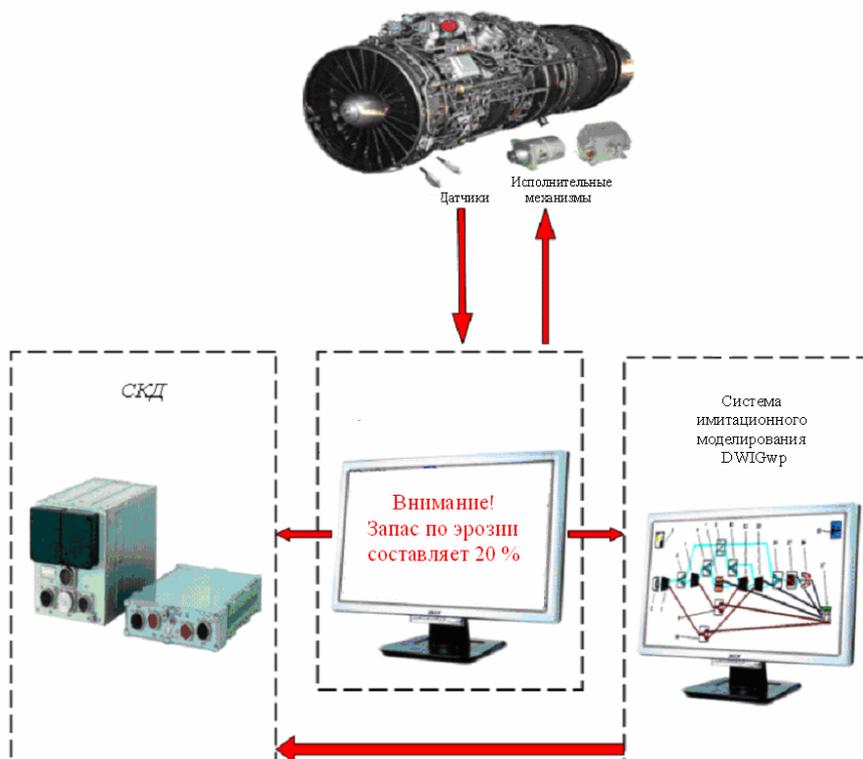


Рис. 4. Схема взаимодействия различных систем при диагностике и контроле технического состояния ГТД

**ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ БАЗОВОЙ ТОЧКИ
В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ
«ОБРАЗМЕРИВАНИЯ» КОМПРЕССОРА
ПРИ НАКОПЛЕНИИ ДЕФЕКТА
«ЭРОЗИЯ ЛОПАТОК»**

При попадании в проточную часть твердых частиц происходит эрозионный износ лопаток компрессора, образуются отложения, которые вызывают изменение геометрии проточной части и последующее ухудшение характеристик двигателя. Процесс изменения геометрии обтекаемых потоком элементов проточной части в основном относится к изменению профиля лопаточных венцов компрессорной части ГТД.

Износ лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата на периферии значительно больше, чем в корневом сечении лопаток

(рис. 5). Характер данного вида износа объясняется наличием сепарирующего эффекта в компрессоре, когда концентрация абразивных частиц на периферии гораздо больше, чем в корневом сечении рабочих лопаток, также как относительная скорость потока. В направляющем аппарате в пристеночном слое уменьшается скорость воздуха (и частиц), поэтому эрозия меньше.

Пусть Δ величина эрозии на передней кромке и на выходе у корыта, характеризующая накопление дефекта «эрозия лопатки». По высоте лопатки она различна, с учетом больших относительных скоростей и меньшей толщины – наиболее ощутима у концов лопатки, хотя кривизна траекторий газа здесь меньше.

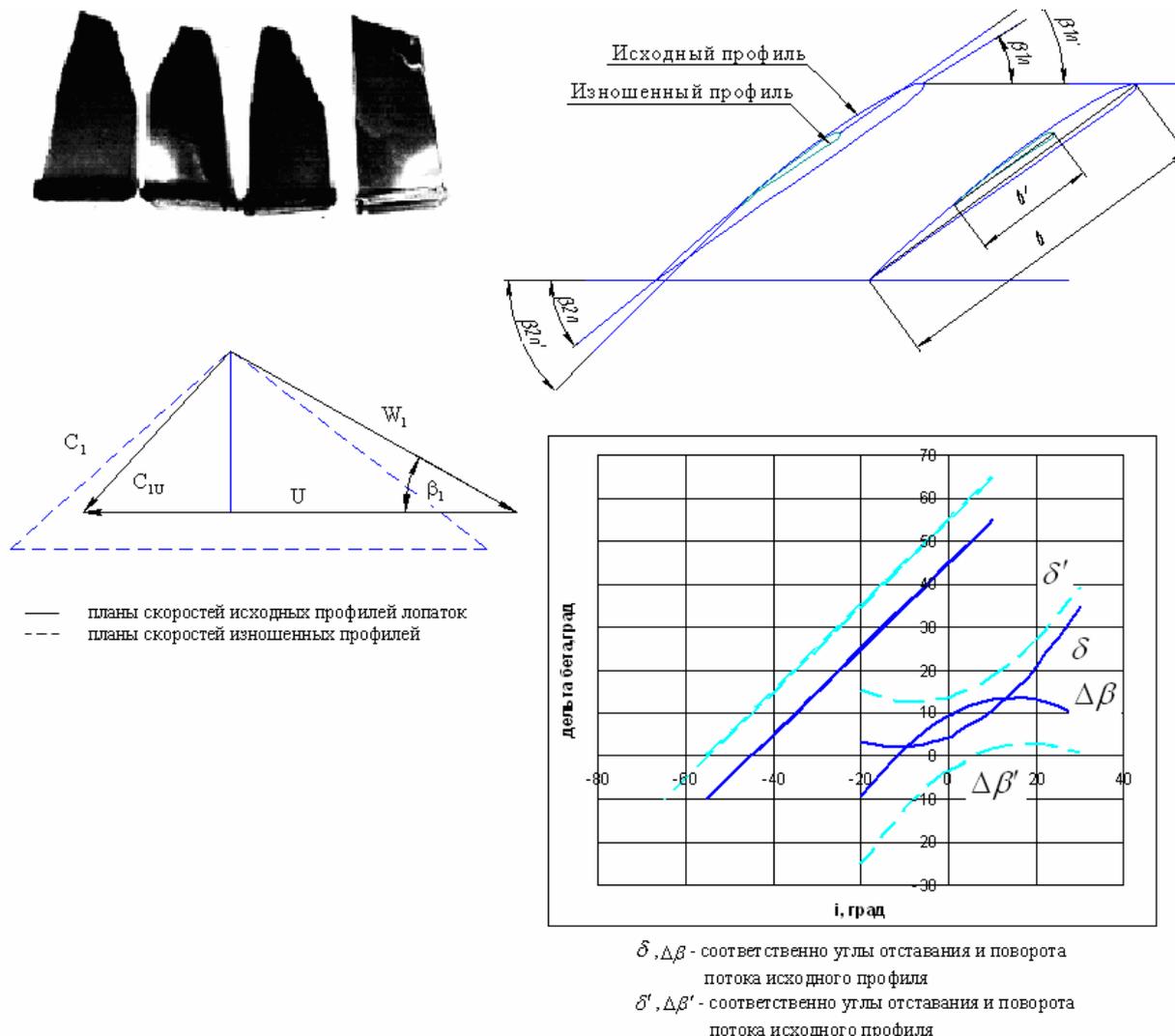


Рис. 5. Схема определения связи изменения геометрических и кинематических параметров РК по мере накопления дефекта «эрозия лопаток компрессора»

Анализ показывает, что по мере эрозии (для небольших Δ) изменение «лопаточного» угла на входе невелико (смещение средней линии профиля компенсируется смещением фронта решетки по потоку), утончение профиля на входе вызывает увеличение коэффициента K_r , характеризующего «загромождение» горла решетки телами лопаток, за счет чего этот коэффициент растет ($K_r \uparrow$), но не существенно. «Лопаточный» угол на выходе из решетки увеличивается, при этом для конкретной исходной геометрии профиля определяется зависимость $\beta_{2,l} = f(\Delta)$ (рис. 6) и, как следствие, с учетом исходной геометрии решеток определяются соответствующие зависимости для изменения хорды (в данном сечении) $b \downarrow = f(\Delta)$ (рис. 7).

Полученный материал по изменению параметров в процессе эксплуатации и результатам разборки с привлечением данных аппаратного

измерения лопаток (в сравнении с новой лопаткой) и методов идентификации позволяет составить модель износа (изменения геометрических размеров) и оценить поведение характеристик лопаточных машин (компрессора и турбины) и двигателя в целом.

После нормальной отработки ресурса компрессор имеет лопатки с существенно иными значениями параметров профиля, что влечет за собой значительное изменение углов атаки на лопатках компрессора, а также изменение треугольников скоростей и, следовательно, состояния потока воздуха в ступени компрессора.

Используя зависимости, полученные с помощью планирования эксперимента [5], можно построить график зависимости угла β_2 от угла β_1 (рис. 8).

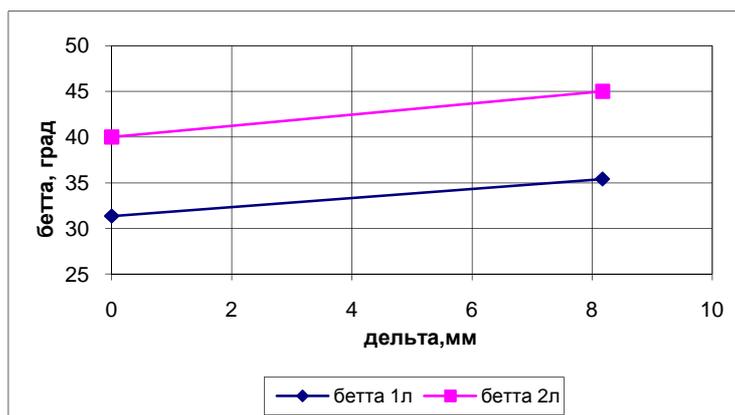


Рис. 6. Изменение геометрических углов входа и выхода потока в зависимости от величины эрозии по передней кромке лопаток

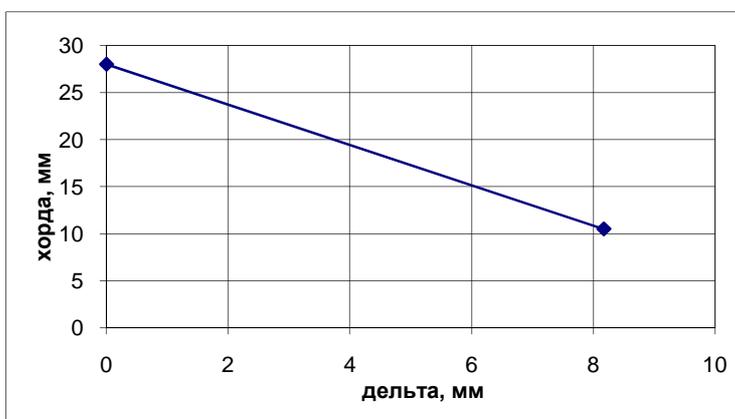


Рис. 7. Изменение хорды профиля в зависимости от величины эрозии по передней кромке лопаток

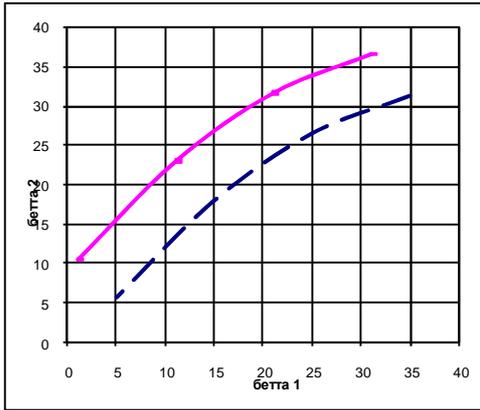


Рис. 8. Зависимость угла β_2 от угла β_1 :
 — для исходного профиля;
 - - - - - для изношенного профиля

Знание геометрических параметров решетки позволяет построить кривую теоретического напора в координатах $\overline{H_T} = f(\overline{c_a}, \lambda_{w1})$. Если ступень с осевым входом и диагональность не учитывается, то зависимость простая $\overline{H_T} = 1 - \frac{c_a}{\text{tg}\beta_2}$ (рис. 9).

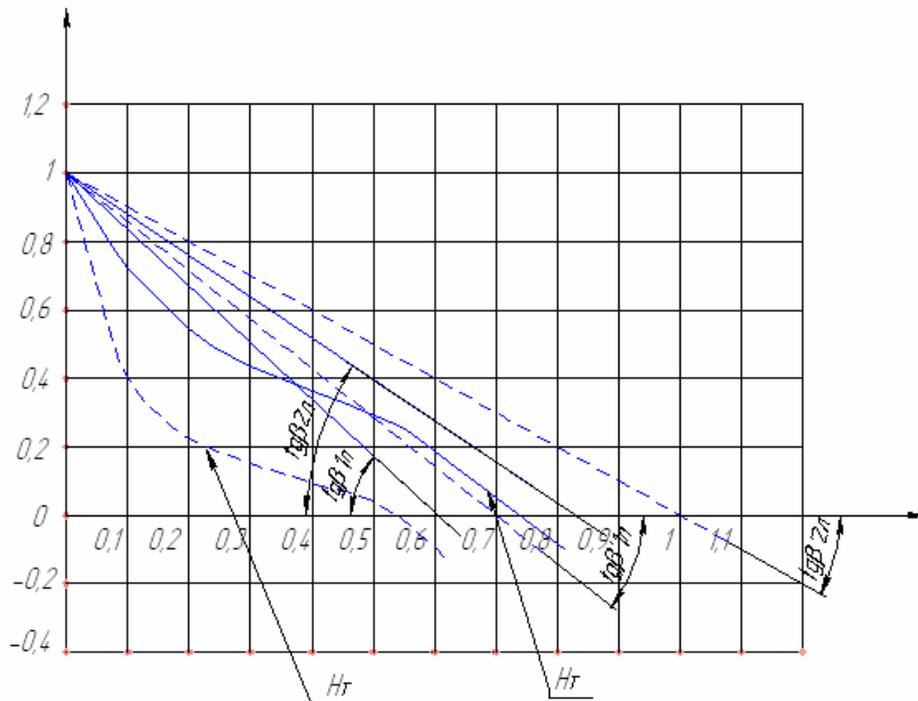


Рис. 9. Изменение $\overline{H_T} = f(\overline{c_a}, \lambda_{w1})$ в зависимости от величины эрозии по передней кромке профиля

Дополнительно полезно показать лучи, идущие под углом $\beta_{2л}$ к оси ординат и луч, идущий под углом $\beta_{1л}$ к оси ординат (рис. 9).

Теоретический напор у изношенного профиля существенно уменьшился из-за значительного уменьшения хорды профиля лопатки.

Используя полученные методом планирования эксперимента значения углов $\delta, \beta_{2л}$ можно определить величину потерь в решетке ξ (рис. 10).

Зная величину потерь можно определить величину кпд, которые связаны между собой следующей зависимостью $\eta = 1 - \zeta$. Путем обобщения данных по планированию эксперимента [5] и зависимости Ольштейна [6] можно вывести взаимосвязь между кпд и $\overline{c_a}$ и построить графики зависимости $\eta_k^* = f(\overline{c_a} = \overline{c_a}^*)$ (рис. 11) для исходного и изношенного профилей.

По формуле $H^* = H_T \eta_k^*$ можно определить изоэнтروпический напор, по которому в дальнейшем можно будет определить степень повышения полного давления.

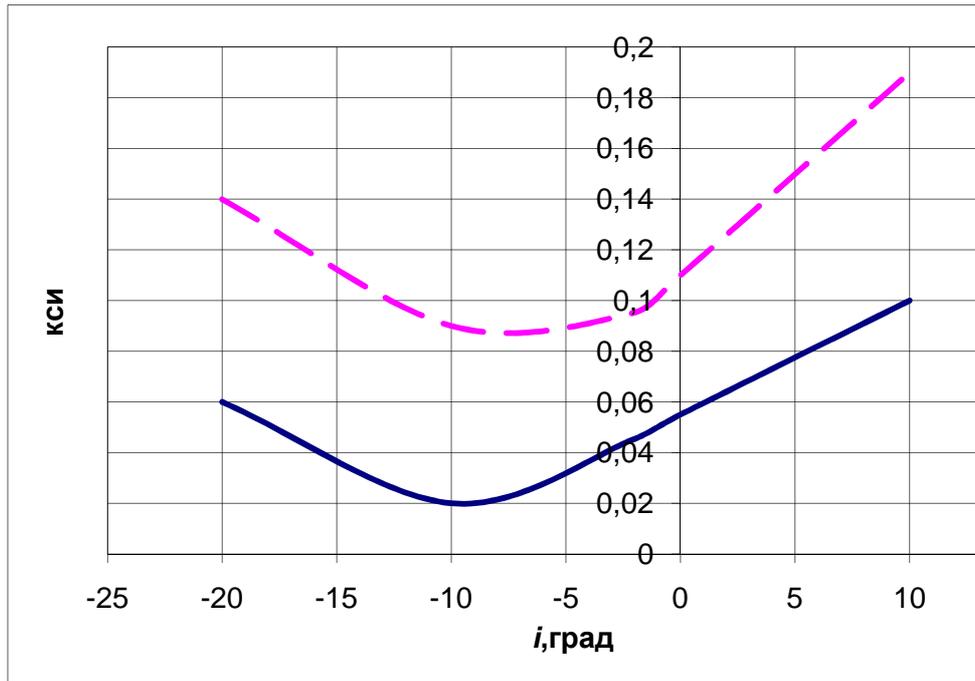


Рис. 10. Изменение $\zeta = f(i)$ в зависимости от величины эрозии лопаток по передней кромке

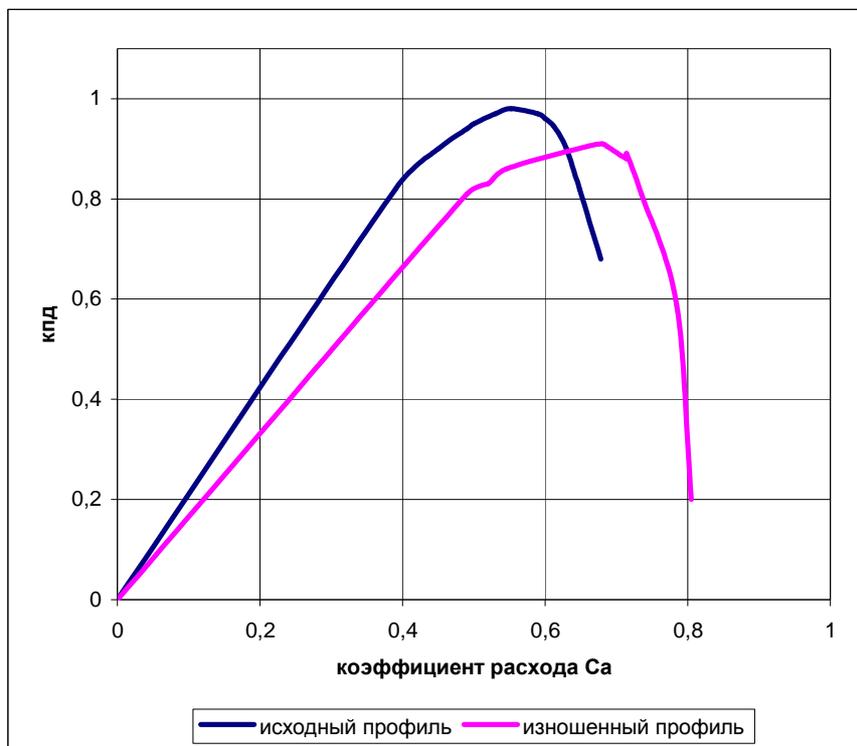


Рис. 11. Изменение $\eta_k^* = f(\bar{C}_a)$ в зависимости от величины эрозии лопаток по передней кромке

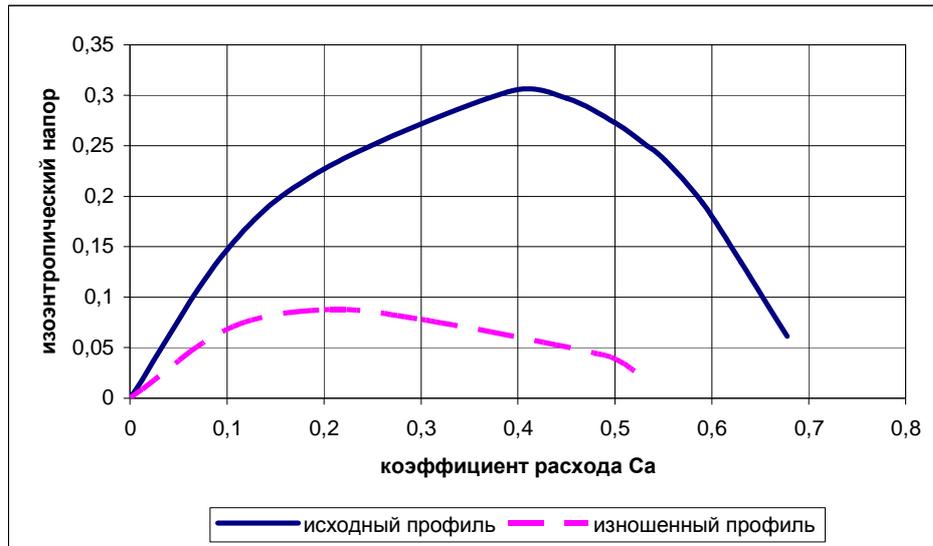


Рис. 12. Изменение $\overline{Hs} = f(\overline{c_a})$ в зависимости от величины эрозии лопаток по передней кромке

Определив значения H_s и построив зависимость $\overline{Hs} = f(\overline{c_a})$ (рис. 12), находим изоэнтропическую работу и далее по формуле

$$\pi_k^* = \left(\frac{H_s}{C_p T_1^*} + 1 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

для каждого значения \overline{Hs} и

λ_{1a} определяем π_k^* , где диапазон изменения $\lambda_{1a} = [0; 1]$.

Использование методов расчета характеристик компрессоров (и турбин) по их геометрии – по соответствующим программам или с использованием упрощенных характеристик вида

$$\overline{H_T} = f(\overline{c_a}, \beta_{1л}, \beta_{2л}, b/t),$$

$\eta_K = f(\overline{c_a}, \beta_{1л}, \beta_{2л}, b/t)$, позволяет оценить соответствующее изменение параметров образмеривания π_{k0}^* и η_{k0} вследствие изменения геометрии лопаток по мере эрозии. При этом уменьшение КПД $\eta_K \downarrow$ дополнительно происходит из-за увеличения неровности поверхности лопаток. Малое изменение «лопаточного» угла на входе $\beta_{1л} \approx \text{const} = f(\Delta)$ позволяет считать, что параметр «образмеривания» по частоте $n_0 \approx \text{const} = f(\Delta)$, а небольшой рост $K_T \uparrow$ вызывает такой же рост параметра «образмеривания» по расходу $G_{пр0} \uparrow$.

Такой анализ для рабочих колес (РК) и НА конкретного каскада компрессора позволяет определить траекторию смещения базовой точки в пространстве параметров «образмеривания»

«параметров СЭ (в данном случае компрессора) по мере накопления дефекта (в данном случае эрозии). При этом смещение вдоль осей n_0 и $G_{пр0}$ практически определяется изменением геометрии первого РК.

Смещения базовой точки $\{B \rightarrow B'\}$. Для предельно допустимого $\Delta_{пр}$ через точку B' нормально вектору $\{B \rightarrow B'\}$ проходит граничная поверхность. Она характеризует в компрессоре предельную эрозию (вид дефекта) (рис. 13).

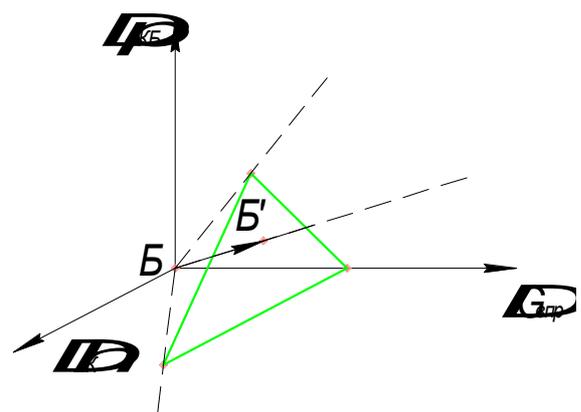


Рис. 13. Определение траектории смещения базовой точки в пространстве параметров «образмеривания»

После определения положения базовой точки производится проверка положения текущей точки $B_э$ в эксплуатации (не ушла ли за граничную поверхность, плоскость).

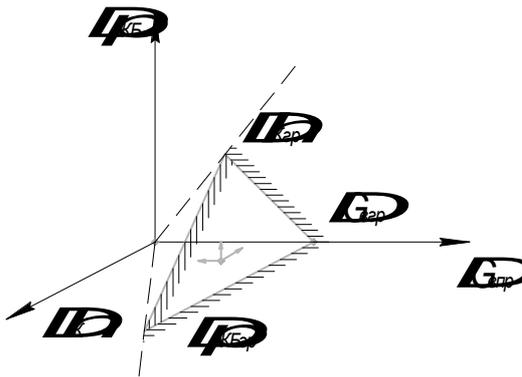


Рис. 14. Построение граничной плоскости

Пусть граничная плоскость характеризуется $\{\Delta\pi_{КБзр}, \Delta G_{ВБзр}, \Delta\eta_{КБзр}\}$ (рис. 14).

Тогда условия отсутствия дефекта в проекциях [4]:

$$\Delta\pi_{КБз} > -\eta_{КБз} \cdot \frac{\Delta\pi_{КБгр}}{\Delta\eta_{КБгр}} - \Delta\pi_{КБгр}, \quad (1)$$

$$\Delta\pi_{КБз} > \Delta G_{ВБз} \cdot \frac{\Delta\pi_{КБгр}}{\Delta G_{ВБгр}} - \Delta\pi_{КБгр}, \quad (2)$$

$$\Delta\eta_{КБз} > -\Delta G_{ВБз} \cdot \frac{\Delta\eta_{КБгр}}{\Delta G_{ВБгр}} - \Delta\eta_{КБгр}. \quad (3)$$

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КОМПРЕССОРА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

За счет налипания конденсированных частиц на внутреннюю поверхность корпуса КПД может даже повышаться (радиальные зазоры уменьшаются), хотя качество поверхности ухудшается. Поэтому можно полагать $\eta_{к0} \approx \text{const}$. Налипание на втулочную поверхность, вместе с налипанием на корпус и лопатки уменьшает кольцевые проходные сечения $F_a \downarrow$. Налипание на лопатки уменьшает «коэффициент загромождения» $K_r \downarrow$ горла решетки. Это существенно уменьшает параметр «образмеривания» по расходу $G_{пр0} \downarrow$ пропорционально уменьшению произведения $F_a \cdot K_r \downarrow$. По аналогии с эрозией накопление дефекта «загрязнение» наиболее существенно меняет геометрию входной кромки и корыта вблизи выхода, но в противоположном направлении (рис. 15). Поэтому аналогично определенным выше определяются зависимости для изменения по мере накопления этого дефекта (толщины налипания) параметров: входного угла $\beta_{1л} \approx \text{const} = f(\Delta)$, утолщения профиля на

входе, уменьшения коэффициента K_r , характеризующего «загромождение» горла решетки телами лопаток, за счет чего этот коэффициент уменьшается ($K_r \downarrow$), но не существенно. Так же (но не существенно) увеличивается «лопаточный» угол на выходе из решетки (из-за смещения средней линии профиля и фронта решетки против потока), поэтому $\beta'_{2л} > \beta_{2л}$, при этом для конкретной исходной геометрии профиля определяется зависимость $\uparrow \beta_{2л} = f(\Delta)$ и как следствие (\Rightarrow), с учетом исходной геометрии решеток определяются соответствующие зависимости для изменения хорды (в данном сечении) $b \uparrow = f(\Delta)$, густоты $b/t \uparrow = f(\Delta)$.

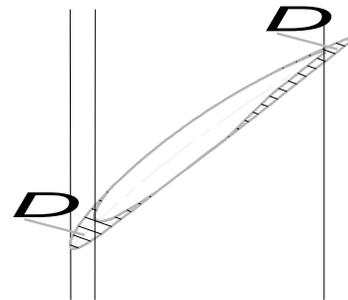


Рис. 15. Изменение геометрии профиля в связи с налипанием грязи на входных и выходных кромках лопатки

В случае налипания на входных и выходных кромках рабочих лопаток компрессора сажи, грязи толщиной Δ базовые параметры «образмеривания» должны изменяться:

$$\pi_{КБ} \uparrow (\bar{H}_b > \bar{H}_b), K_r \downarrow, \eta_K \downarrow, F_a \downarrow$$

$$\Delta G_{ВпрБ} = f(\Delta) < 0$$

В первом приближении будем считать $\Delta\eta_{КБ} = \text{idem}$, $\Delta\pi_{КБ} = \text{idem}$, $n_{прБ} = \text{idem}$ и изменяется только $G_{Впр0}$, т. е. базовая точка смещается только вдоль оси $G_{Впр0}$ и граничная поверхность (по дефекту «загрязнение ПЧ») расположена нормально к этой оси.

Тогда условие отсутствия дефекта «загрязнения» $0 > \Delta G_{ВБз} > \Delta G_{ВБгр}$. Иначе должно появляться сообщение «загрязнение ПЧ» с указанием узла, и указание действий, например «требуется промывка».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поочередно рассматривая все возможные дефекты в каждом элементе, в пространстве «параметров образмеривания» его характеристики, определяется положение всех граничных поверхностей. При этом реальный дрейф базовых точек может происходить по произвольной траектории, но выход базовой точки за одну из граничных поверхностей в конкретном элементе распознается как соответствующий этой граничной поверхности дефект или отказ. Используемые при этом ИМ ТС, исходные обезразмеренные характеристики элементов, заранее подготовленные, подобранные положения граничных поверхностей в пространстве «параметров образмеривания» при этом могут иметь разный статус – расчетные и экспериментальные, типовые (для данного ТС) и индивидуальные (для данного экземпляра ТС).

Степень детализации ИМ позволяет определить, насколько детально может быть произведена диагностика – локализация дефектов производится по тем элементам, которые явно представлены в ИМ.

Преимуществом разработанной в проекте новой методологии для диагностики состояния ТС на основе имитационного сетевого моделирования является ее более высокая эффективность. Она не требует приводить контролируемые режимные параметры ТС к какому-либо режиму, позволяет локализовать типы дефектов и отказов, судить о состоянии отдельных элементов в составе ТС (локализовать дефекты и отказы по элементам ТС).

Разработанный метод определения состояния систем (распознавание дефектов, отказов элементов, оценка запасов по накоплению дефектов) пригоден и эффективен для диагностики состояния не только технических, но и биологических, экологических, экономических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривошеев И. А.** Методы и средства диагностики состояния технических систем на основе идентификации их имитационных моделей // Альманах современной науки и образования. 2008. № 7 (14): Математика, физика, строительство, архитектура, технические науки и методика их преподавания.

2. **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. М., 2004.

С. 75–80. (на англ. яз.)

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

4. **Данко П. Е., Попов А. Г., Кожевникова Т. Я.** Высшая математика в упражнениях и задачах. Ч. 1: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1999. 416 с.

5. Обобщение результатов продувок плоских компрессорных решеток методом регрессионного анализа / П. П. Казанчан [и др.] // Лопаточные машины и струйные аппараты. Вып. 2. Машиностроение, 1967.

6. **Холщевников К. В.** Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.

ОБ АВТОРАХ



Кривошеев Игорь Александрович, декан ФАД, проф. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УГАТУ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двиг., электроракетн. двиг. и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. автоматиз. проектирования авиац. двигателей.



Камаева Регина Филгатовна, аспирант, м.н.с. той же каф. Дипл. инженер по авиац. двиг. и энерг. установкам (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. проектир., диагностики и имитац. моделир. авиац. двиг. и энергоустановок.



Струговец Сергей Анатольевич, зам. гл. конструктора ФГУП УАП «Гидравлика» по малоразмерным ГТД. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 1982). Иссл. в обл. производства, эксплуатации и анализа работы ГТД авиац. и наземн. применения.