

УДК 629.735

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК В ГТД И ГТУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ\*

Кривошеев И.А., Рожков К.Е., Соболев М.А., Старостин Н.С.

*Уфимский государственный авиационный технический университет  
e-mail: krivosh@sci.ugatu.ac.ru*

**Аннотация.** *Представлены результаты разработки и верификации системы имитационного моделирования «Venes», которая позволяет производить расчет газодинамических параметров по высоте ступени осевого компрессора, получать их суммарные характеристики. Показано, что разработанная система позволяет анализировать изменение характеристик вследствие эрозионного износа лопаток компрессора газотурбинного двигателя в составе газоперекачивающего агрегата. В связи с этим разработка может использоваться при параметрической диагностике состояния газотурбинных двигателей и установок, используемых на компрессорных станциях при транспортировке газа.*

**Ключевые слова:** *имитационное моделирование, осевой компрессор, эрозия, газотурбинный двигатель, параметрическая диагностика*

При использовании газотурбинной техники на газопроводах требуется обеспечивать требуемый уровень надежности (минимум вероятности аварий). Обеспечение требуемой надежности двигателя в процессе эксплуатации привело к необходимости постоянного контроля состояния двигателя или ГТП (газотурбинного привода) в составе ГПА (газоперекачивающего агрегата) на КС (компрессорной станции). Минимизация стоимости ЖЦ (жизненного цикла изделия) для заказчика, увеличение степени готовности и, тем самым, поддержание высокой безопасности в эксплуатации – ключевые цели реализации системы управления состоянием двигателя или ГТУ (газотурбинной установки). Поэтому развитие методов и средств диагностики состояния ГТД и ГТУ, в т.ч. параметрической диагностики сейчас актуально.

Если раньше двигатели и ГТУ снимались с эксплуатации по достижении запланированного числа полётов или наработки, то в настоящее время с развитием средств мониторинга состояния двигателей и ГТУ актуальным стал переход к эксплуатации по техническому состоянию. Большинство существующих методов диагностики основано на выявлении заметных изменений основных параметров двигателя и ГТУ, позволяющие определять повреждения в узлах двигателя и ГТУ. 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

---

\* Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

параметров двигателя, как КПД, производительность компрессора, площади сопла и т.д.

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

Для расчета характеристик компрессоров, подвергшихся изменению геометрии вследствие эрозионного износа или образования отложений, авторами создана система имитационного моделирования (СИМ) «Venec»[2], которая позволяет по известной геометрии лопаточных венцов осевых компрессоров построить характеристики и проследить изменение параметров компрессора в процессе эксплуатации. В основу предложенной системы имитационного моделирования положен метод [3], который позволяет по известной геометрии элементарных решеток профилей и известных параметрах потока на входе в решетку рассчитать параметры потока на выходе из решетки. Для упрощения расчетов предполагаем, что поток осесимметричный, т.е. не учитываются изменение параметров потока в окружном направлении. Предполагается, что такие эффекты, как изменение параметров потока поперек межлопаточного канала решетки, можно с достаточной степенью точности представить осредненными данными. В дополнение к допущению об осесимметричности течения предполагается, что все радиальные перетекания происходят внутри межлопаточных каналов, а за пределами решеток поток находится в условиях радиального равновесия. В этом случае уравнение течения в радиальном направлении имеет вид[4]:

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{C_u^2}{r}, \quad (1)$$

где  $dp/dr$  – градиент давлений;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>,

$C_u$  – окружная составляющая окружной скорости, м/с,

$r$  – радиус, м.

Упрощённую теорию радиального равновесия можно использовать для расчетов потока с разделением проточной части несколькими линиями тока. Расчетные осевые сечения располагаются в осевых зазорах между венцами лопаток. Расход в каждой такой части предлагается рассчитывать с помощью уравнения расхода в интегральной форме:

$$\Delta G = 2\pi \int_{r_{i-1}}^{r_i} \rho C_a r dr, \quad (2)$$

где  $r_i$  – радиальные координаты соседних линий тока,

$\Delta G$  – расход между соседними линиями тока,

$C_a$  – осевая составляющая абсолютной скорости, м/с.

Практическое применение данной программы предполагает их предварительную тщательную верификацию путем сопоставления с опытными данными. Для верификации была взята модельная ступень К-50-10[5], трехмерная модель которой представлена на рис. 1. Размеры проточной части, характеристики профилей входного направляющего аппарата (ВНА), рабочего колеса (РК), направляющего аппарата (НА) приведены в атласе исходных модельных ступеней осевых компрессоров. Повенцовая модель ступени осевого компрессора в программе «Venес» представлена на рис. 2.

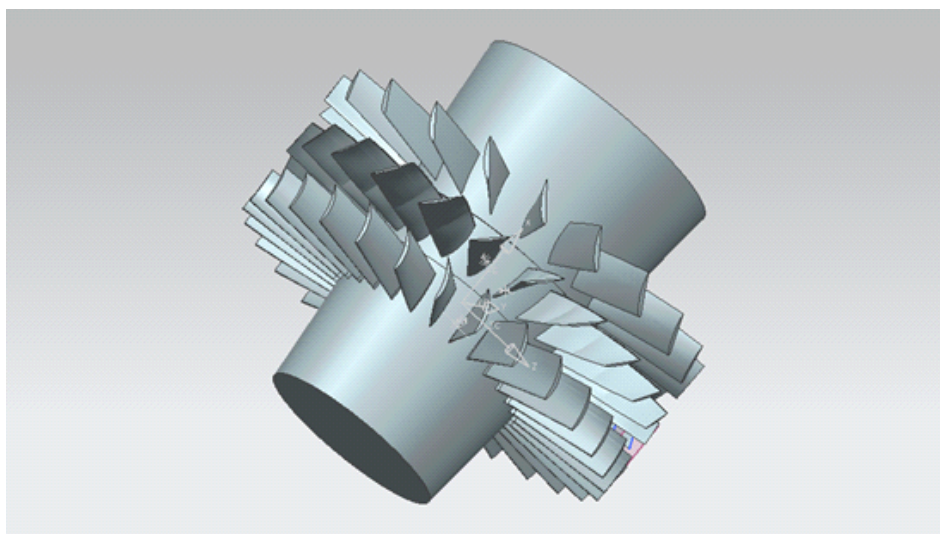


Рис. 1. CAD-модель ступени К-50-10 без учета зазоров

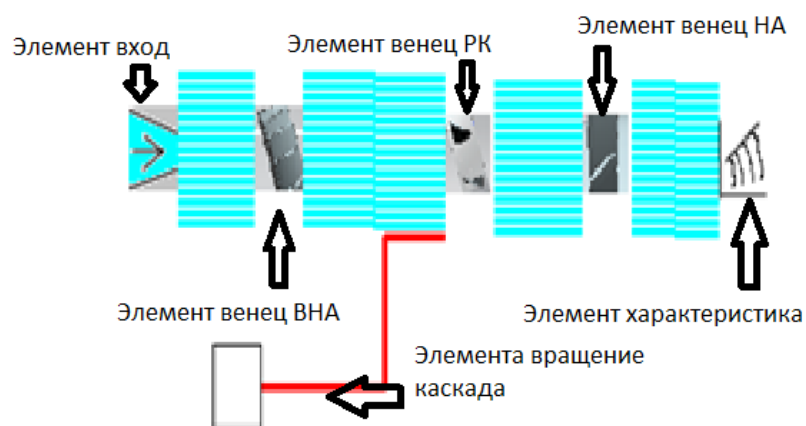


Рис. 2. Пример модели ступени К-50-10 в разработанной СИМ «Venec»

На рис. 3 представлены результаты расчета характеристики осевой ступени в разработанной программе. Кроме того был произведен газодинамический 3D CAD/CAE-газодинамический расчет в программном комплексе Ansys CFX для более полного сравнения результатов расчета с данными экспериментальных характеристик осевой ступени.

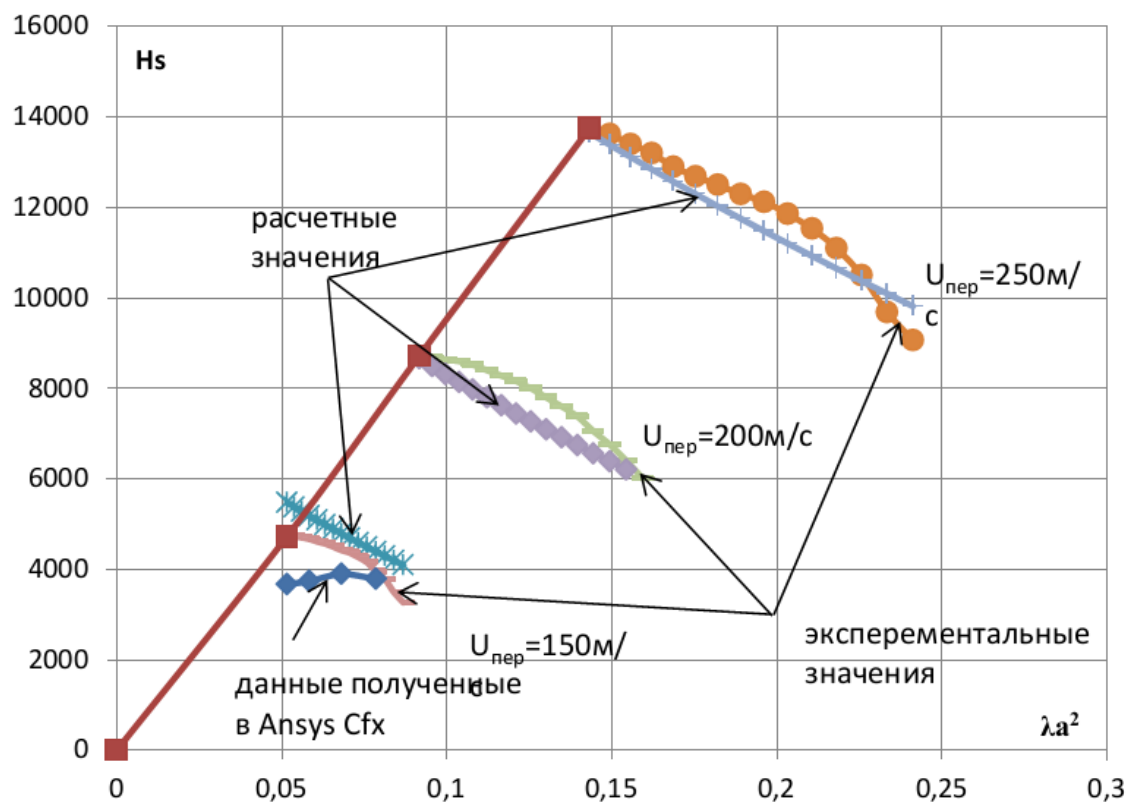


Рис. 3. Характеристика ступени осевого компрессора К-50-10

$$H_s = f(\lambda_{1a})$$

Как видно из рисунка, результаты расчета по данной методике дают меньшую погрешность при вычислении по сравнению с результатами расчета в Ansys CFX. С использованием разработанной СИМ «Venec» была рассчитана характеристика ступени компрессора низкого давления (КНД) газотурбинного привода (ГТП) АЛ-31СТ в составе газоперекачивающего агрегата (ГПА) – для исходной геометрии и в процессе эрозии и (или) загрязнения в некоторой фазе, определяемой характерным размером максимального загрязнения. В упрощенном варианте полагалось, что процесс загрязнения идет в обратном направлении (по отношению к процессу эрозии) и описывается аналогично. В рассматриваемом случае использованы данные, когда при разборке двигателя АЛ-31СТ для плановых мероприятий и дефектации были выявлены незначительные загрязнения лопаток КНД (величина загрязнения по входной и выходной кромке составляла 1 мм). Произведено сравнение новой лопатки и лопатки снятой с двигателя (рис. 4). На рис. 5 показано изменение геометрии профиля лопатки в периферийном сечении 1 ступени компрессора низкого давления ГТД:  $\beta_{11} = 41,47^\circ$ ,  $\beta_{21} = 52,13^\circ$ ,  $\theta = 10,66^\circ$ ,  $b/t = 1,1$ ,  $\chi_f = 0,55$ , угол выхода из ВНА  $\alpha_{11} = 55,5^\circ$ . В результате загрязнения лопаток в процессе эксплуатации изменились геометрические параметры профилей лопаток  $\beta_{11} = 39,56^\circ$ ,  $\beta_{21} = 50,39^\circ$ ,  $\theta = 10,83^\circ$ ,  $b/t = 1,13$  (рис. 4).

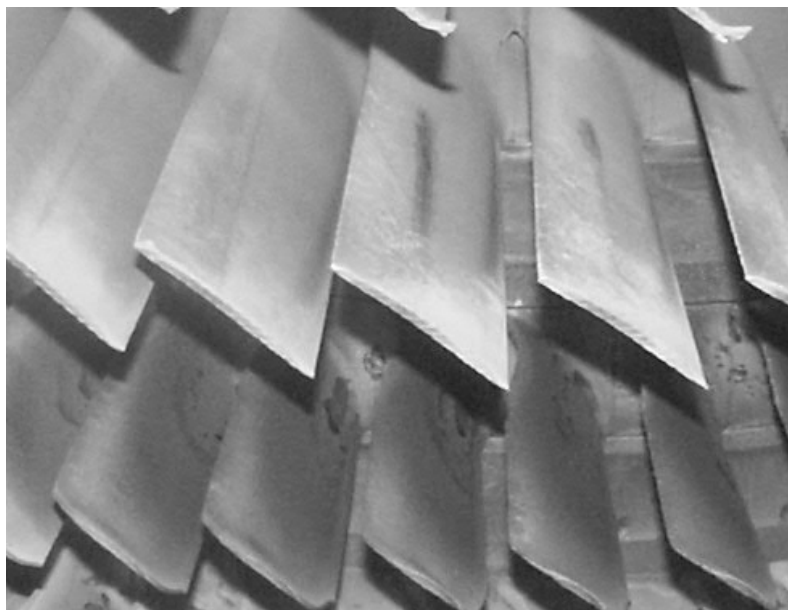


Рис. 4. Лопатки ротора КВД ГТП АЛ-31СТ (со следами загрязнения и эрозии) после работы 5000 часов в составе ГПА на компрессорной станции.

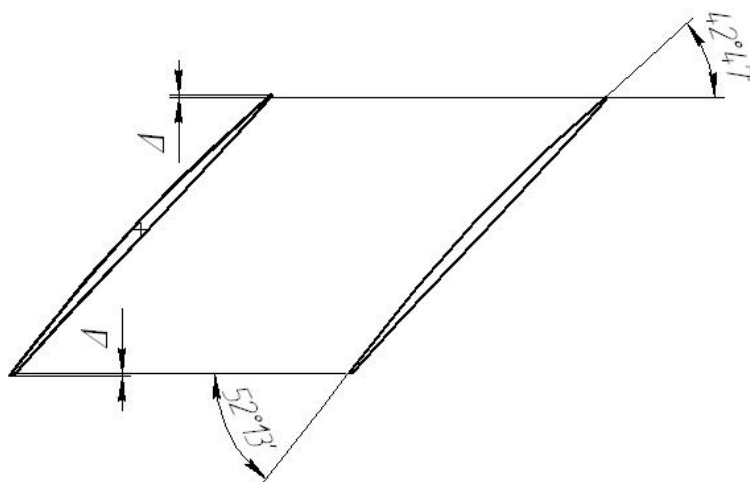


Рис. 5. Решетка профилей лопаток 1 ст. КНД АЛ-31СТ  
(на левом профиле показано изменение за счет загрязнения)

Ниже приведены результаты расчета с учетом изменения геометрии. На всех последующих рисунках показаны одновременно сплошной линией характеристика новой лопатки и пунктирной – характеристика лопатки полученной после определенной наработки. Задаемся диапазоном изменения  $\alpha_{1a}$   $[0;1]$ . Записывая изоэнтропическую работу, как  $H_s = \frac{Hs}{c_a^2} \cdot 1,83^2 \cdot 288,15 \cdot \lambda_{1a}^2$ , строим график  $H_s = f(q(\lambda_{1a}))$  с изолиниями  $\bar{c}_a = \text{const}$ . При этом самая верхняя изолиния  $\bar{c}_a = \text{const}$  характеризует границу помпажа. Находим изоэнтропическую работу  $H_s = \frac{Hs}{c_a^2} \cdot 1,83 \cdot 288,15 \cdot \lambda_{1a}^2$  и строим график  $H_s = f(\lambda_{1a})$  (рис. 6).

Полученный результат нетрудно представить в традиционных координатах (рис. 7).

Приведенная методика является элементом разрабатываемой авторами технологии параметрической диагностики состояния ГТД и ГТУ по результатам идентификации их имитационных моделей, с использованием трендов контролируемых в эксплуатации параметров, выявления деформации характеристик узлов и сопоставления их с результатами моделирования влияния загрязнения и эрозии лопаток.

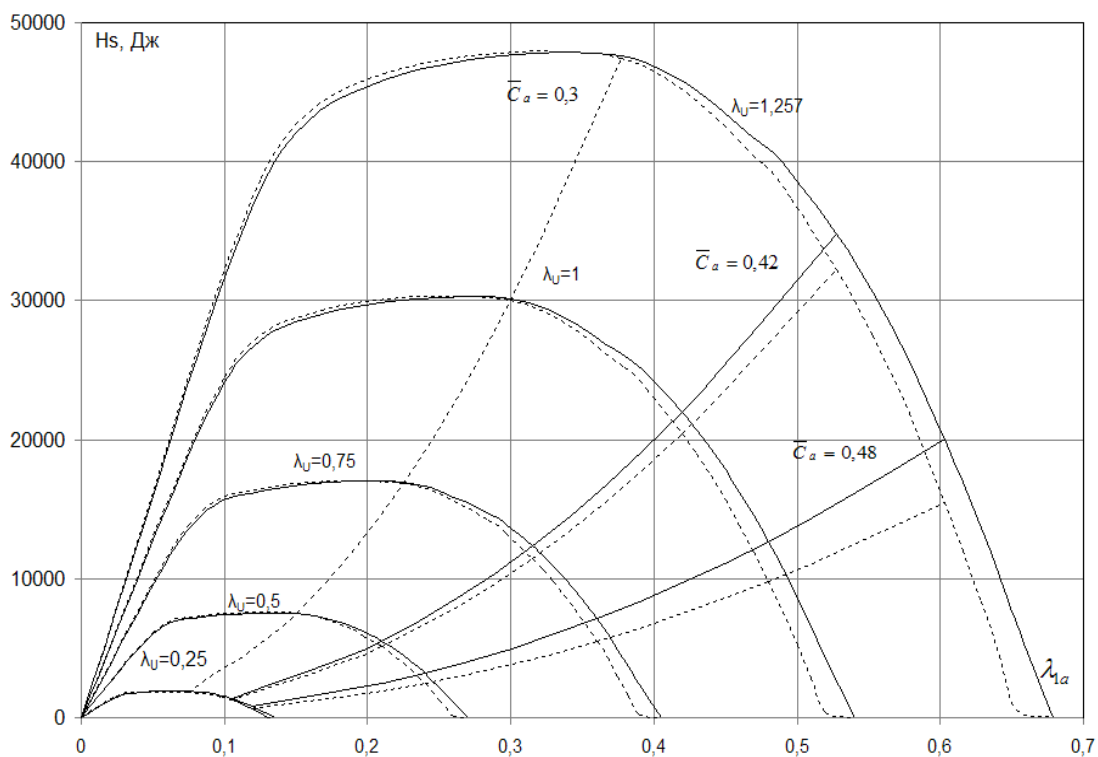


Рис. 6. Характеристика первой ступени КНД АЛ31-СТ – исходная и с учетом загрязнения

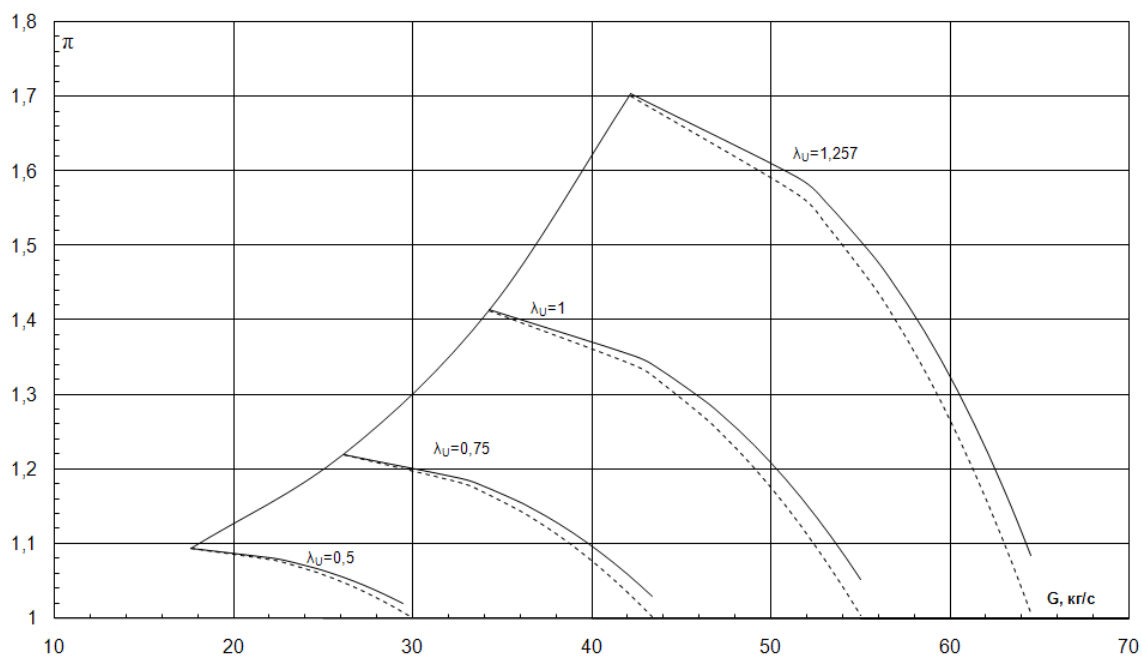


Рис. 7. Характеристика первой ступени компрессора АЛ31-СТ

### Выводы

Разработанная авторами система имитационного моделирования (СИМ) «Venec» позволяет использовать её для расчета характеристик лопаточных венцов, ступеней, многоступенчатых осевых компрессоров. Получение характеристики компрессора является одной из ключевых задач на различных стадиях проектирования от эскизного до технического проекта. Достоверная характеристика компрессора (каскада компрессора) позволяет рассчитать характеристики разрабатываемого изделия на установившихся (нагрузочная и климатическая характеристики) и на неустановившихся режимах (динамическая характеристика ГТД) с высокой точностью. При проектировании компрессора предложенная программа позволяет производить выбор геометрических параметров лопаточных венцов, а в эксплуатации – производить учет влияния на характеристики изменения геометрии лопаток (за счет эрозии, загрязнения и т.д.). При диагностике состояния ГТД и ГТУ в эксплуатации разработанная СИМ «Venec» является одним из основных компонентов, т.к. позволяет заранее проанализировать влияние загрязнения и эрозии лопаток на изменение характеристик узлов, а по результатам идентификации модели установки решить обратную задачу – выявить фактические значения загрязнений и эрозии в конкретных венцах и ступенях.

### Литература

1. Кривошеев И.А., Струговец С.А., Камаева Р.Ф. Анализ влияния частиц пыли на параметры ступеней осевого компрессора // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Том 7. № 7. С. 35 - 40.
2. Кривошеев И.А., Рожков К.Е. Расчет характеристик компрессоров (Venec) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №201261217 – 2012
3. Кривошеев И.А., Рожков К.Е. Развитие методов анализа и расчета характеристик решеток профилей осевых // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 2(61). С. 26 - 32.
4. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.
5. Атлас исходных модельных ступеней осевых компрессоров. Центральный котлотурбинный институт им. И.И. Ползунова. Л.: Отдел научно-технической информации, 1967.



**DEVELOPMENT OF BLADES CONDITION PARAMETRIC DIAGNOSTICS  
METHOD FOR GAS TURBINE ENGINES AND GAS TURBINE POWER  
PLANTS WITH IMITATING MODELING TECHNOLOGY**

I.A. Krivosheev<sup>1</sup>, K.E. Rozhkov, M.A. Sobolev, N.A. Starostin  
*Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia*  
*e-mail: <sup>1</sup>krivosh@sci.ugatu.ac.ru*

**Abstract.** *The results of development and verification of simulation system «Venec», which allows calculating of the gas-dynamic parameters by axial compressor stage height and receiving their total performances, are represented. It is shown that the developed system allows analyzing changes in the characteristics due to erosive wear of the compressor blades of gas turbine engine in the gas-compressor unit. In this connection the development can be used for parametric diagnostics of gas turbine engines and plants used in compressor stations for gas transportation*

**Keywords:** *imitating modeling, axial compressor, erosion, gas turbine engine, parametric diagnostics*

**References**

6. Krivosheev I.A., Strugovets S.A., Kamaeva R.F. Analiz vliyaniya chastits pyli na parametry stupenei oseвого kompressora (Analysis of influence of dust particles on the parameters of steps axial compressor), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, Volume 7, Issue 7, pp. 35 - 40.
7. Krivosheev I.A., Rozhkov K.E. Raschet kharakteristik kompressorov (The characteristics compressors calculation). Venec / Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM (The Certificate on official registration of the computer program). №201261217 – 2012.
8. Krivosheev I.A., Rozhkov K.E. Razvitie metodov analiza i rascheta kharakteristik reshetok profilei osevykh (Development of methods for the analysis and calculation of cascade performances of axial-flow compressors), *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, Issue № 2(61), pp. 26 - 32.
9. Kholshchevnikov K.V. Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin (Theory and design of aviation blade machines). Moscow, Mashinostroenie, 1970. 610 p.
10. Atlas iskhodnykh model'nykh stupenei osevykh kompressorov (Atlas of the baseline model stages of axial compressors). Leningrad, TsKTI, 1967.