

## ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С ДЕФЕКТНЫМИ ЛОПАТКАМИ

Зубков И.С., Блинов В.Л., Беляев О.В., Искорцев Е.Ю., Плишкин П.И.  
ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,  
lamqtada@gmail.com

*Ключевые слова: газотурбинная установка, осевой компрессор, техническое состояние, лопаточный аппарат, численное моделирование, газодинамика, прочность*

Режимы работы современных газотурбинных установок (ГТУ) связаны с высокими нагрузками на основные рабочие элементы – лопатки ротора и статора [1]. В процессе работы на лопаточный аппарат осевого компрессора (ОК) действует целый ряд факторов, которые обуславливают высокие требования к их надежности и прочности [2]. Среди них можно выделить высокую нагрузку от центробежной силы (что особенно сильно проявляется в случае высоких частот вращения, характерных для современных авиадвигателей), повышенные вибрации при высоких наработках установки и попадание различных механических примесей (пыль, влага, и др.) в проточную часть (ПЧ). Все данные факторы могут вызвать как серьезные дефекты, способные привести к аварийному останову или выходу ГТУ из строя, так и небольшие повреждения лопаток, которые приведут к изменению условий обтекания и рабочих параметров компрессора и, как следствие, к смещению рабочей точки в сторону границы неустойчивой работы.

С целью оценки влияния на работу ОК и ГТУ таких дефектов на этапе эксплуатации, а также для осуществления рациональной компоновки ПЧ лопатками, подвергшимся ремонту (например, зачистка и шлифовка забоины [3] и др.), на этапе обслуживания предлагается использование специальной системы, основанной на проведении корреляционно-регрессивного анализа по данным, полученным в ходе численного моделирования дефектов лопаточного аппарата различной конфигурации [4, 5]. При этом основу предлагаемой системы составляют методы вычислительной газодинамики (CFD) и методы конечных элементов (FEM), которые на сегодняшний день заняли важное место при анализе условий течения потока и при оценке статической и динамической прочности лопаток и уже вышли примерно на один уровень с натурным экспериментом.

При этом следует обратить внимание на три важных особенности проведения моделирования. Первая связана с точностью расчетов: ввиду малых размеров некоторых дефектов важно исключить как можно больше допущений, принятых на всех этапах работы. Во-первых, при построении трехмерных моделей отклонение по геометрии должно иметь значения не более 0,10-0,05 мм (или не иметь отклонений вообще), в ином случае будет невозможно определить, является ли изменение условий течения проявлением дефекта или вызвано неточностью. Особенно важно соблюсти точность построения входных кромок, поскольку именно их геометрия будет в большей степени влиять на конечный результат расчета [6]. И, во-вторых, важно выбрать параметры расчетной модели, обеспечивающие наибольшее соответствие результатов действительному поведению потока в ПЧ. При рассмотрении моделирования газодинамики, наиболее подходящей для решения текущей задачи будет являться модель Shear Stress Transport (SST), соединяющая в себе сильные стороны моделей  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$  и позволяющая исследовать различные течения потока без снижения точности, вызванного некачественным моделированием пограничного слоя [7]. Не менее важно при этом провести анализ различных опций выбранной модели, влияющих на конечный вид распределений параметров (например, коэффициент  $A1$ , коэффициент Intermittency, модификация Reattachment и другие) [8, 9, 10]. Выбранные параметры должны обеспечивать корреляцию результатов расчета и экспериментальных данных с точностью до

1%, в ином случае расчеты будут являться недостоверными. При оценке прочности важное значение принимает настройка сеточной модели. В таком случае требуется избежать ошибок дискретизации – различий между исходным объектом и его топологией, описанной конечными элементами, и аппроксимации – различий между действительным распределением искомых функций в пределах конечных элементов и их представлением при помощи аппроксимирующих функций [11], что достигается за счет построения сетки высокого качества с применением различных методов и настроек. Еще одним необходимым условием является обеспечение связи между прочностным анализом и CFD-расчетами для более точного описания состояния материала (давление и температура на поверхности при текущих условиях обтекания) при наличии различных дефектов и режимов течения потока.

Вторая особенность заключается в выборе источника и типа данных для проведения верификации разработанного подхода. На начальном этапе проведения газодинамических расчетов при формировании массива исходных данных требуется выбрать легкоизмеряемые и наглядные параметры работы компрессора, к которым можно отнести, например, распределения параметров (например, полного давления) по высоте канала за отдельными венцами или ступенями, а также различные интегральные характеристики, характеризующие работу всего компрессора (КПД, степень сжатия и др.). Важно так же определить способ и место измерения выбранных данных, поскольку при невыполнении этого фактора возможно получение больших по величине расхождений между расчетными и исходными данными. В случае динамики и прочности лопаток в качестве данных для верификации могут служить различные расчеты по известным методикам, например, по представленным в [3, 12], а также результаты прочностных и вибрационных испытаний лопаток.

Третья особенность связана с автоматизацией расчета. Поскольку в основе рассматриваемой системы лежат массивы данных – результаты однотипных расчетов различных дефектов, то на этапе их проведения потребуется настройка автоматического вынесения различных параметров и распределений в удобной форме (изображения и графики, координаты характерных точек и значения параметров в них). При грамотной настройке по завершении каждого расчета потребуется только запустить специальный макрос, который без участия пользователя соберёт все необходимые данные для последующего анализа и внесения их в состав предлагаемой системы.

Другие особенности настройки расчетной модели будут выбраны в соответствии с экспериментальными данными и условиями эксплуатации для какого-то определенного компрессора. На текущем этапе выполнения работы в качестве объекта исследования был выбран низкоскоростной двухступенчатый ОК: в работе [13] представлены параметры, необходимые для проведения расчетов, среди которых геометрическая конфигурация лопаток и ПЧ в целом (координаты точек профилей, радиусы их установки, осевое положение и др.), характеристики работы компрессора (частота вращения ротора, расходно-напорная характеристика, положение рабочей точки и др.), контрольные сечения и полученные в ходе натурального эксперимента распределения параметров потока в них и т.д. На текущий момент были построены трехмерные и сеточные модели рабочих и направляющих венцов, сформировано несколько вариантов расчетных моделей. В области газодинамики были проведены первые расчеты для анализа влияния граничных условий и опций турбулентности на параметры потока, а также для настройки автоматического вывода результатов расчета для их последующей обработки. На этапе оценки прочности были исследованы различные методы разделения лопатки на участки для более качественного построения сетки, сеточная сходимость и влияние различных условий закрепления лопатки. После верификации расчетных моделей в геометрию лопаток будут внесены различные дефекты, для которых будут проводиться однотипные расчеты, из результатов которых будет сформирована представленная система.

### Список литературы

1. Aust J., Pons D. Taxonomy of gas turbine blade defects // *Aerospace*. 2019. No. 6. 35 p.
2. Passey R.D.C. Reliability of compressor aerofoils // *Progress in Aerospace Sciences*. 1976. No. 17. Pp. 67-92.
3. Конструкция и прочность газотурбинных двигателей / Лозицкий Л.П. и др. М.: Воздушный транспорт, 1992. 535 с.
4. Zubkov I.S., Blinov V.L. Influence of the axial compressor blade row defects on the industrial gas turbine performance // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. No. 1683 042049.
5. Zubkov I.S., Blinov V.L. Mathematical model of the axial compressor blade in system assessing technical condition of the industrial gas turbine // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. No. 1089 012004.
6. Areal parametric characterisation of ex-service compressor blade leading edges / K. Walton [et al.] // *Wear*. 2014. No. 321. Pp. 79-86.
7. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. No. 32 (8). Pp. 1598-1605.
8. Байков В.Н., Волинов М.А. Взаимная согласованность закономерностей течения и гидравлического сопротивления // *Вестник МГСУ*. 2013. № 5. С. 133-140.
9. Брянская Ю.В., Перемежаемость течения при переходном режиме гидравлического сопротивления // *Вестник МГСУ*. 2013. № 1. С. 177-183.
10. Matyushenko A.A., Garbaruk A.V. Adjustment of the  $k-\omega$  SST turbulence model for prediction of airfoil characteristics near stall // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. No. 769.
11. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Учебное пособие. Часть 1. Н. Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2012. 71 с.
12. Жирицкий Г.С., Стрункин В.А. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. М.: Изд-во «Машиностроение», 1968. 520 с.
13. Hathaway M.D., Okiishi T.K. Aerodynamic design and performance of a two-stage axial-flow compressor (baseline). Technical Report. Iowa State University. 1983. 190 p.

### Сведения об авторах

Блинов Виталий Леонидович, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: рабочий процесс турбомашин, диагностика технического состояния газотурбинных установок.

Зубков Илья Сергеевич, магистрант 1 курса. Область научных интересов: численное моделирование рабочих процессов осевых компрессоров и других турбомашин.

Беляев Олег Владиславович, студент-бакалавр 4 курса. Область научных интересов: исследование дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора.

Искорцев Егор Юрьевич, студент-бакалавр 4 курса. Область научных интересов: прочностные расчеты лопаточного аппарата осевого компрессора.

Плишкин Павел Игоревич, студент-бакалавр 4 курса. Область научных интересов: моделирование течения в проточной части осевого компрессора.

### FEATURES OF THE TWO-STAGE AXIAL-FLOW COMPRESSOR NUMERICAL SIMULATION WITH DEFECTIVE BLADES

Zubkov I.S., Blinov V.L., Plishkin P.I., Belyaev O.V., Iskorcev E.Yu.

Yeltsin UrFU, Ekaterinburg, Russia, lamqtada@gmail.com

*Keywords: gas turbine, axial-flow compressor, technical condition, blades, numerical simulation, gas-dynamics, strength.*

The paper presents the forming process of models for numerical simulation of gas-dynamics in the axial-flow compressor annulus with defective blades and for strength and modal analysis of these blades.