

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ
ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА КОМПРЕССОРА НА ПАРАМЕТРЫ
РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ**

Зубков И.С., Блинов В.Л.

ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Россия

lamqtada@gmail.com v.l.blinov@urfu.ru

Аннотация. В работе рассмотрен алгоритм анализа влияния дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора на характеристики работы газотурбинной установки. Предложено математическое описание топологии геометрии лопаточного профиля при помощи кривых Безье, разработан алгоритм построения проточной части осевого компрессора с возможностью внесения локальных дефектов и изменений в лопаточный аппарат для решения задач учета влияния данных изменений на работу турбомашин. В работе так же представлены результаты верификации разработанного описания при помощи методов численного моделирования, а также результаты расчетов профилей при наличии в них геометрических изменений и дефектов.

Ключевые слова: газотурбинная установка, осевой компрессор, турбина, лопатка, дефекты, геометрические отклонения, численное моделирование, математическое описание

**DEVELOPING OF THE MODEL FOR ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE
AXIAL COMPRESSOR BLADE ROW DEFECTS ON THE GAS TURBINE
UNITS PERFORMANCE**

Zubkov I.S., Blinov V.L.

Yeltsin UrFU, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The paper presents the key stages of developing a geometric model of the axial compressor blade. The model is based on Bezier curves, which are used to design the airfoil and allow making local changes to the blade geometry. This model is designed to assess the technical condition of the axial compressor being a part of an

industrial gas turbine, depending on the defects of axial compressor blade row (in the annulus) and the turbine as a whole. The study presents the basic equations of the model, provides examples of airfoil, blade and stage modeling, and shows the results of model verification using numerical modeling methods.

Key words gas turbine unit, axial compressor, turbine, blade, defects, geometric deviations, numerical simulation, mathematical description

Рабочие характеристики ГТУ во многом зависят от технического состояния отдельных ее узлов [1], например, от состояния осевого компрессора (ОК). Поскольку потребляемая им мощность превышает половину мощности, вырабатываемой турбиной и во многом зависит от отношения давлений в цикле, КПД турбомашин и т.д., в эксплуатации важно обеспечить и поддерживать высокий КПД ОК и достаточный запас газодинамической устойчивости, которые, в первую очередь, зависят от совершенства его лопаточного аппарата. При этом в процессе эксплуатации ГТУ меняются размеры и состояние поверхности лопаток, изменяются радиальные зазоры, что приводит к изменению характеристики ОК и параметров работы ГТУ в целом. В межремонтные периоды заводы-изготовители осуществляют восстановление формы лопаточного аппарата или производят его частичную и полную замену. При этом отклонение геометрических параметров отдельных лопаток от эталонных значений после восстановления и ремонта ОК ГТУ могут также оказывать влияние на достижимый в эксплуатации уровень мощности, КПД и запаса устойчивой работы.

Проведение диагностики и оценки техсостояния ГТУ осуществляется различными методами, требующими существенных экономических и временных затрат. Например, применение 3D-сканирования требует наличия дорогостоящего оборудования (сканер, комплект марок и т.д.) и непосредственного доступа к исследуемому объекту, а также определенных временных затрат на сканирование, построение и проверку трехмерной модели. С целью заменить уже ставшие «традиционными» методы многие машиностроительные мероприятия ведут разработки по формированию цифровых двойников своего оборудования. Важной задачей данных исследований является разработка такого математического описания лопаточного аппарата, которое позволило бы построить профили любой формы, а также обеспечило бы внесение любых изменений в их геометрию.

В рамках текущего исследования была разработана математическая модель, позволяющая учитывать изменения отдельных геометрических

параметров с использованием данных о реальных отклонениях формы лопаток после эксплуатации и ремонта. Разработанное описание основано на кривых Безье, описывающих входные кромки, спинку и корытце (рисунок 1), координаты X и Y управляющих точек которых вычисляются на основе ключевых геометрических параметров (угол установки профиля (β_y), хорда профиля (b), радиусы входной и выходной кромки ($R_{вх}$; $R_{вых}$) и углы их заострения (φ_1 ; φ_2), входной и выходной лопаточные углы ($\beta_{1л}$; $\beta_{2л}$) [2]). Такой подход позволяет достаточно точно построить исходный профиль и обеспечивает гибкое изменение его геометрии [3], и положительно зарекомендовал себя при решении задач оптимизации [3, 4].

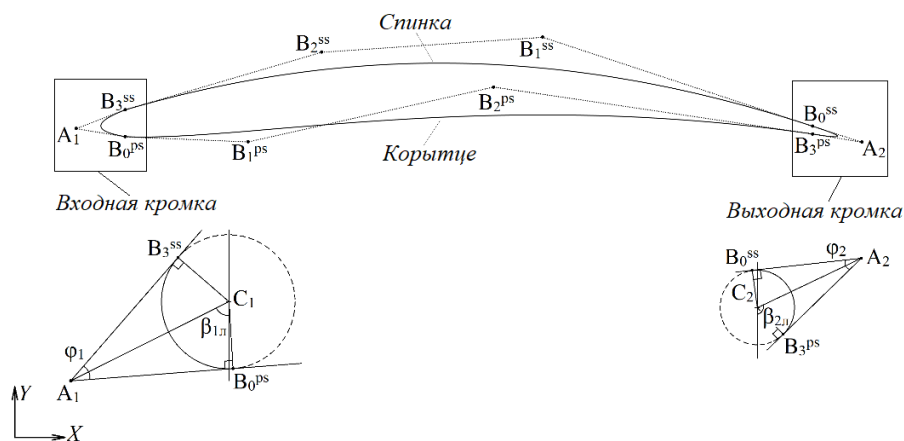


Рисунок 1 – Построение лопаточного профиля предложенным методом

Помимо формирования профиля разработанное описание позволяет построить модель лопатки (рисунок 2-а) из набора профилей (в представленном алгоритме возможно задание 5 и более сечений), для чего в исходных данных задается корневой радиус лопатки (R_k) и ее высота (l), на основе которых определяется вертикальная координата (Z) точек профиля:

$$Z = R_k + nl;$$

Где $n \in [0; 1]$ – параметр, определяющий положение сечения ($n = 0$ профиль будет расположен в корне лопатки, а при $n = 1$ – в ее периферии).

В описании предусмотрено задание осевого (по осям x и y) смещения профилей с целью формирования проточной части (рисунок 2-б), путем смещения всех профилей, формирующих одну конкретную лопатку, а также для создания навала лопатки (за счет смещения только определенных профилей). Во-втором случае линия центра масс лопаток описывалась кривой Безье четвертого рода (рисунок 2-в). Более подробно данный алгоритм рассмотрен в [5].

Изменение координат точек профиля для задания дефектов в описании возможно двумя способами (рисунок 2-г). Во-первых, если известны геометрия

профиля (представлен набор координат) и параметры дефекта (например, глубина и расположение забоины), возможно ручное изменение координат точек в определенной части профиля – в одной из 8 выделенных зон. Во-вторых, возможно изменение координат сразу нескольких точек одновременно за счет изменения положения соответствующей управляющей точки кривой Безье, что может быть полезно в случае, например, изгиба кромок. Дефекты для трехмерной модели лопатки могут быть внесены теми же способами как на этапе перестроения отдельного профиля, так и непосредственно при работе с 3D-моделью.

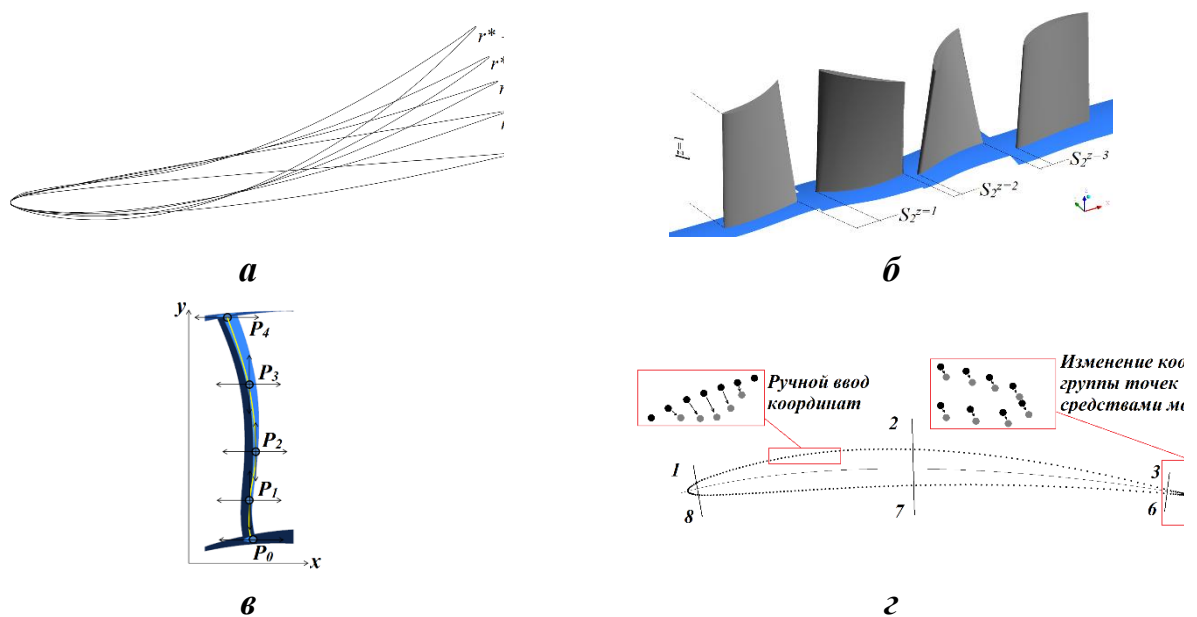
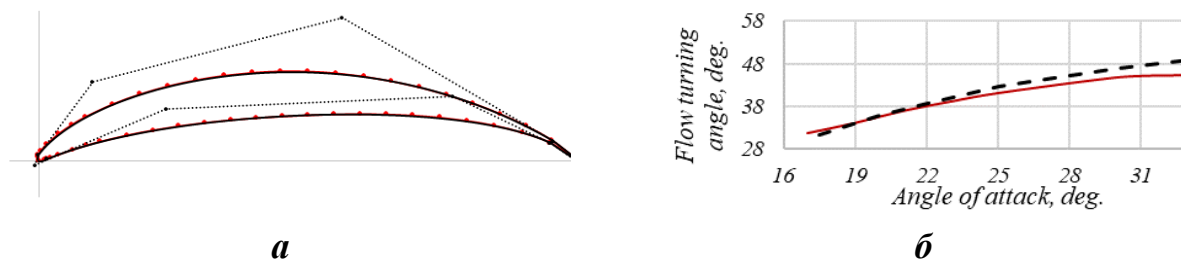


Рисунок 2 – Процесс формирования лопатки (а), проточной части (б).
Задание навала лопатки (в) и внесение дефектов (г)

Для верификации разработанного описания были выбраны лопаточные профили серии NASA 65 с известными характеристиками [6] (рисунок 3-а). Расчетные условия и более подробные результаты проведения верификации представлены в работах [7, 8].



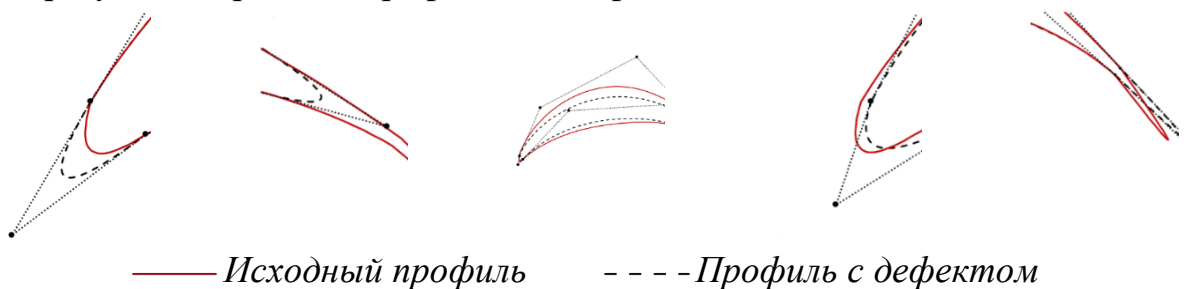
Для а: —●— Исходный профиль; — Расчетный профиль;
Управляющие точки кривых Безье;

Для б: — Экспериментальные данные; ---- Расчетные данные;

Рисунок 3 – Построение профиля (а) и результаты верификации (б)

В целом, модель можно считать достоверной, поскольку расчетная характеристика практически полностью совпадает с расчетной (рисунок 3-б), а наличие расхождений обусловлено предсказанным модулем-решателем срывом со спинки лопатки, в то время как при проведении натурального эксперимента срывных явлений не наблюдалось [6]. Связать такой эффект можно, прежде всего, с наличием допущений расчетной модели, например, с идеальной моделью рабочего тела. При этом важно отметить, что верификация расчетной модели является важной задачей любых работ, связанных с численным моделированием, однако в текущем исследовании она не является приоритетной. Куда более важной задачей является демонстрация возможностей разработанной модели. Рекомендации по выбору параметров расчетной модели, а также некоторые другие результаты моделирования с использованием профилей указанной серии приведены в работе [8].

Следующим этапом выполнения работы являлась проверка возможностей модели по внесению изменений в профиль, а также проверка их при помощи численного моделирования. В геометрию профиля искусственно были внесены 5 дефектов, условно обозначенных как утонение входной кромки, утолщение выходной кромки, увеличение толщины профиля и изгиб концевых сечений (рисунок 4). В действительности происходило изменение сразу нескольких геометрических параметров. Внесение отклонений в геометрию профиля осуществлялось путем изменения положения управляющих точек кривых Безье. В качестве результатов так же была выбрана зависимость потерь давления от угла атаки, при этом исходными данными для данной постановки задачи являлись результаты расчета профиля без дефектов.



Слева направо: Утонение входной кромки; утолщение выходной кромки; уменьшение максимальной толщины; уменьшение входного лопаточного угла; увеличение выходного лопаточного угла

Рисунок 4 – Исследуемые геометрические отклонения

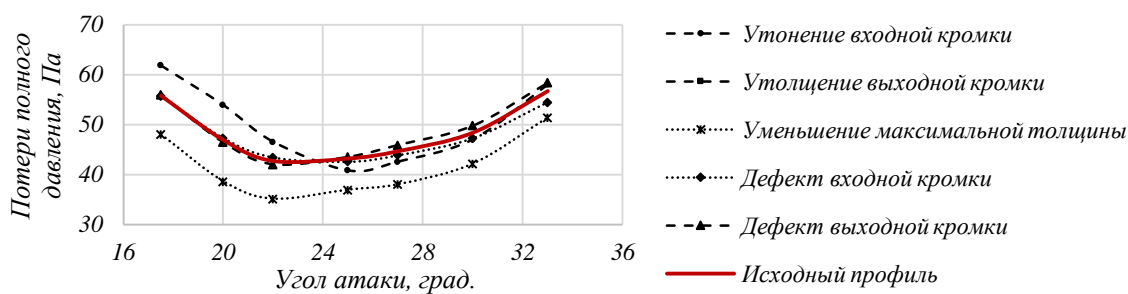


Рисунок 5 – Характеристика профиля с учетом дефектов

Все рассмотренные дефекты привели к перераспределению давления по профилю на различных его участках, например, в случае утонения входной кромки на начальном участке (до $0,1b$), а при изменении максимальной толщины профиля – на спинке при $(0,1...0,5)b$ и на корытце при $(0,1...0,8)b$. В целом, полученные результаты вполне согласуются с теоретическими предположениями о влиянии дефекта на характеристики. Например, уменьшение максимальной толщины профиля привело к существенному снижению уровня потерь полного давления во всем диапазоне углов атаки при максимальном отклонении 17% (абсолютных). При этом утонение входной кромки позволило снизить уровень потерь только в определенном диапазоне углов атаки $24^\circ < i < 30^\circ$, тогда как при значениях $i < 24^\circ$ наблюдается превышение величины потерь давления относительно бездефектного профиля. Также практически все дефекты оказали существенное влияние на угол поворота потока.

Повышенные требования к эффективности и надежности газотурбинного оборудования обуславливают необходимость в проведении качественного ремонта отдельных его деталей и узлов. Однако зачастую происходит так, что отремонтированные двигатели комплектуются элементами, содержащими различные отклонения формы и размеров, которые, как правило, лежат в пределах допустимых значений. Несмотря на это, данные элементы будут оказывать влияние на характеристики работы всей установки, при чем во многих случаях данное влияние является существенным. С целью оценки влияния дефектных элементов на работу оборудования многие машиностроительные предприятия ведут разработку цифровых моделей, позволяющих предсказывать эффективность установки. Представленный в текущей работе алгоритм построения компрессорных лопаток, позволяющий вносить локальные изменения в их геометрию, является базовым компонентом находящейся в разработке более крупной прогностической модели. Полученные результаты являются примером того, как в дальнейшем будет производиться анализ всей

проточной части ОК, в том числе и при изменении параметров ГТУ. Так же, важной задачей для дальнейшей работы является проведение прочностных исследований и разработка прогностической модели по условиям прочности наиболее нагруженных элементов. Такие модели найдут применение при дефектации лопаток и обоснованной комплектации ОК на этапе ремонта ГТУ и ГТД, а также при прогнозировании изменения параметров их работы на этапе эксплуатации.

Библиографический список

1. Zaslavskiy E.A. Estimation of the driven gas turbine unit technical performance using the standard measuring systems / Zaslavskiy E.A., Blinov V.L., Komarov O.V. // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference (HSTED-2020). Prague, Czech Republic, 2020. pp. 1-7.

2. Ревзин Б.С. Осевые компрессоры газотурбинных газоперекачивающих агрегатов: Учебное пособие / Б.С. Ревзин. – 2-е изд., стер. Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 90 с.

3. Jaiswal S. Shape parametrization of airfoil shapes using Bezier curves / Jaiswal S. // Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. 2017. pp. 79-85

4. Komarov O.V., Blinov V.L., Serkov S.A., Sedunin V.A. Optimization approach and some results for 2D compressor airfoil // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems. 2016. Vol. 8(3). pp. 39-46.

5. Серков С.А. Параметрическое исследование тангенциального навала лопаток осевого компрессора / С.А. Серков, В.Л. Блинов, В.А. Седунин. // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 15–18 декабря 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – с. 216-218.

6. Emery, J.C. Systematic two-dimensional cascade test of NACA 65-series compressor blades at low speeds: NACA Report 1368 / J.C. Emery, L.J. Herrig, J.R. Erwin, A.R. Felix. – NACA, 1958.

7. Зубков И.С., Разработка цифровой модели учета влияния дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора ГТУ на характеристики работы установки / И.С. Зубков, В.Л. Блинов // LXVII Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок. Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и паротурбинных установок в

электроэнергетике РФ (Санкт-Петербург, 15-16 сентября 2020 г.). – Санкт-Петербург, 2020. – с. 132-135

8. Блинов В.Л., Разработка принципов параметрического профилирования плоских решеток осевых компрессоров ГТУ на основании результатов многокритериальной оптимизации / В.Л. Блинов, Ю.М. Бродов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. 168 с.