

УДК 621.438

Совершенствование геометрии рабочего колеса ступени центробежного компрессора и расчет его характеристик

Ступоченко Владимир Александрович^(*)

stupochenko.v@mail.ru

Стецкая Татьяна Анатольевна

steckaya_tatyana1@mail.ru

SPIN-код: 7966-4374

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлен процесс построения рабочего колеса центробежного компрессора (ЦБК) с помощью программного обеспечения CFturbo с целью совершенствования геометрии трехмерной модели для дальнейшего расчета характеристик ступени в программном комплексе ANSYS. Проведена работа по построению 3D-модели ступени ЦБК по заданным параметрам на номинальном режиме работы, определены основные допущения математического расчета методом «контрольных объемов», построена расчетная сетка и заданы граничные условия. Проанализированы результаты вычислений и сделаны выводы о численных значениях, характеризующих ступень компрессора с целью последующей увязки компрессора и турбины.

Ключевые слова: проектирование компрессора, параметризация, рабочее колесо центробежного компрессора, газодинамическая характеристика ступени компрессора, запас газодинамической устойчивости, метод контрольных объемов, численное моделирование

Improving the geometry of the impeller of the centrifugal compressor stage and calculating its characteristics

Stupochenko Vladimir Alexandrovich^(*)

stupochenko.v@mail.ru

Stetskaya Tatyana Anatolyevna

steckaya_tatyana1@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The process of constructing a centrifugal compressor impeller using CFturbo software is presented to improve the geometry of a 3D model for further calculation of stage characteristics in ANSYS. Work has been done to build a 3D model of the compressor stage according to specified parameters in nominal operating mode. Basic assumptions of mathematical calculation using “control volume” method were determined, computational grid was constructed, and boundary conditions were set. Calculation results were analyzed and conclusions were drawn about numerical values characterizing compressor stage to link compressor and turbine.

Keywords: compressor design, parameterization, centrifugal compressor impeller, gas dynamic characteristics of compressor stage, gas dynamic stability reserve, control volume method, numerical modeling

Введение. Сегодня проектирование агрегатов и конструкций в машиностроение происходит с применением вспомогательных ПО, что значительно со-

кращает и упрощает процесс создания и доводки новых машин. Для решения конструкторских задач в газотурбостроении может быть использована программа CFturbo, созданная для проектирования компонентов турбомашин (насосов, вентиляторов, компрессоров, турбин). Она позволяет создавать геометрию с нуля или модифицировать существующую [1].

Работа посвящена получению газодинамических характеристик ступени центробежного компрессора (ЦБК) газотурбинной установки с применением для проектирования ПО CFturbo, которое позволяет параметризовать 3D-модель колеса и быстро корректировать ее для получения лучших показателей эффективности работы ЦБК.

Материалы и методы. Совершенствование геометрии ЦБК было принято проводить с применением параметризации на платформе Workbench ПО ANSYS. Запараметризованная трехмерная модель создавалась в программе CFturbo, расчетная сетка строилась в сеточном генераторе TurboGrid, куда автоматически переносилась геометрия из предыдущей программы.

В качестве известных параметров в CFturbo задавались степень повышения давления, массовый расход воздуха на входе и частота вращения вала на номинальном режиме. На следующем этапе были ограничены радиальные размеры колеса, которые соответствовали габаритам колес из предыдущих работ [2–4]. Было выбрано число основных и сплиттерных лопаток. По распределению скорости в меридиональном сечении (рис. 1, а) получен оптимальный меридиональный контур. Из библиотеки программы выбран профиль NASA 6309.

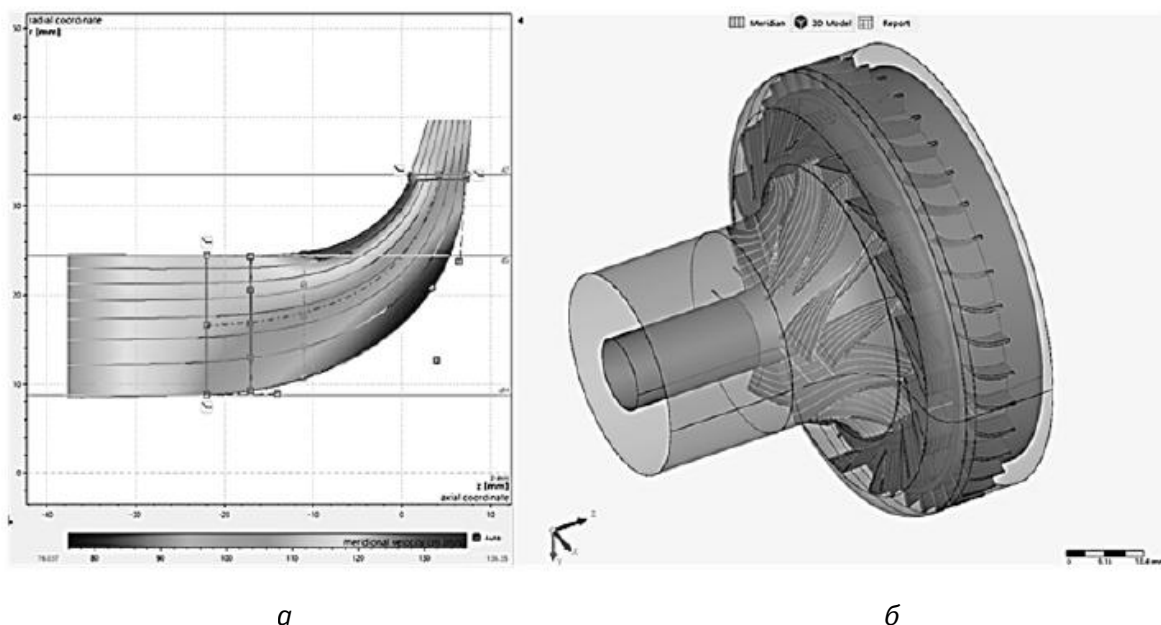


Рис. 1. Построение трехмерной модели ступени ЦБК:

а — распределение меридиональной скорости; б — расчетная трехмерная модель ЦБК

Далее были подготовлены модели лопаточного диффузора (ЛД) и спрямляющего аппарата (СА), а для равномерности поля скоростей на входе добавлен входной участок. В результате была получена трехмерная модель ступени ЦБК, представленная на рис. 1, б.

Расчеты газодинамических характеристик ступени проведены на основе предыдущих исследований [2–4], в которых геометрия РК получалась с помощью модуля BladeGen ПО ANSYS. Для всех элементов ступени ЦБК были определены допущения, построена расчетная сетка (рис. 2, *а*) и заданы граничные условия (рис. 2, *б*) для постановки задачи на расчет методом «контрольных объемов» с помощью ПО ANSYS CFX.

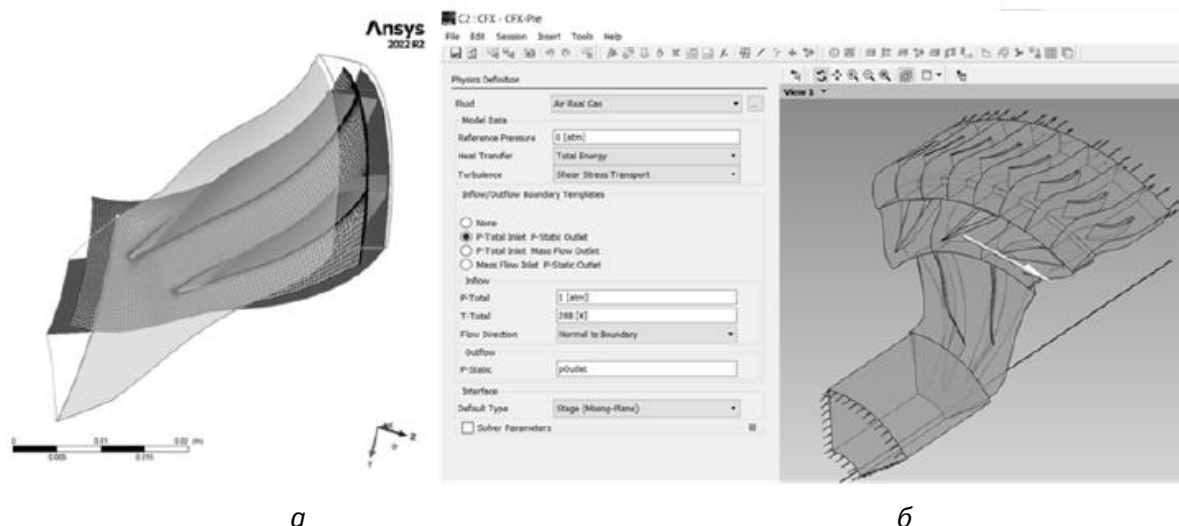


Рис. 2. Настройка расчета в ПО ANSYS:

а — расчетная сетка РК; *б* — граничные условия ступени ЦБК; *в* — значения y^+

При выборе модели турбулентности (МТ) ключевыми факторами стали точность результатов и экономия вычислительных ресурсов. Выбранная для решения поставленной задачи модель турбулентности SST Ментера представляет из себя комбинацию $K-\omega$ модели в пристеночных областях и $K-\epsilon$ модели в областях, находящихся на достаточном удалении от стенки [5]. Согласно рекомендациям [6], качество сетки определялось по безразмерному параметру сгущения y^+ (рис. 3). Для модели турбулентности Shear Stress Transport (SST) для разрешения пограничного слоя значение y^+ не должно превышать 3, однако эти рекомендации не являются универсальными для всех частей проточной части. Из-за нелинейного увеличения скорости по ходу течения и сложной структуры потока у кромок лопаток наблюдается превышение этого значения в пределах нормы.

Для получения ветвей характеристики ступени в ходе математического расчета выбраны частоты вращения 0,5, 0,58, 0,83, 0,9 и 1 от номинальной. Статическое давление за спрямляющим аппаратом варьировалось от атмосферного до максимально возможного для сходимости задачи для каждой частоты.

Результаты. В результате ранее проведенных расчетов [2–4] на относительных частотах вращения 0,58, 0,83 и 1 были получены напорные ветви и значения КПД (рис. 4, *а*). В ходе анализа результатов нового расчета (рис. 4, *б*) выявлен рост КПД на 11,7 % (с 0,558 до 0,632), что соответствует более полной картине работы компрессора.

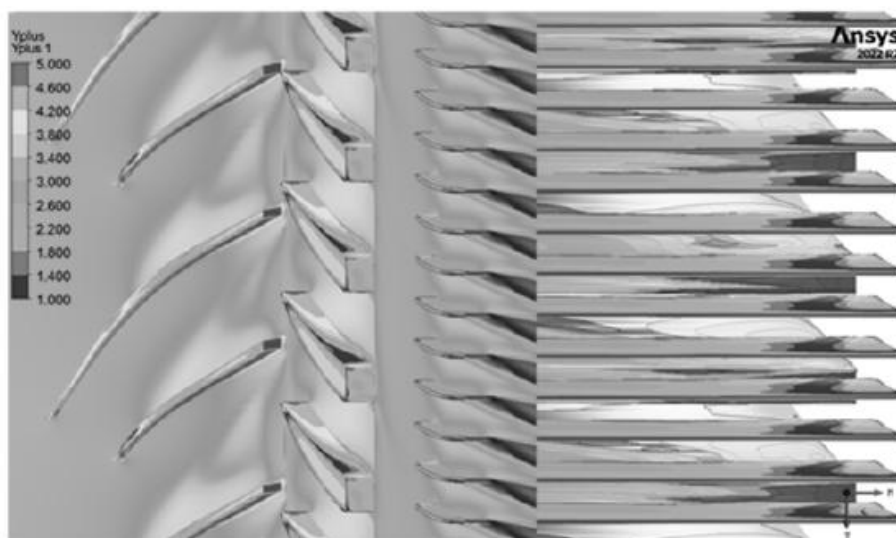
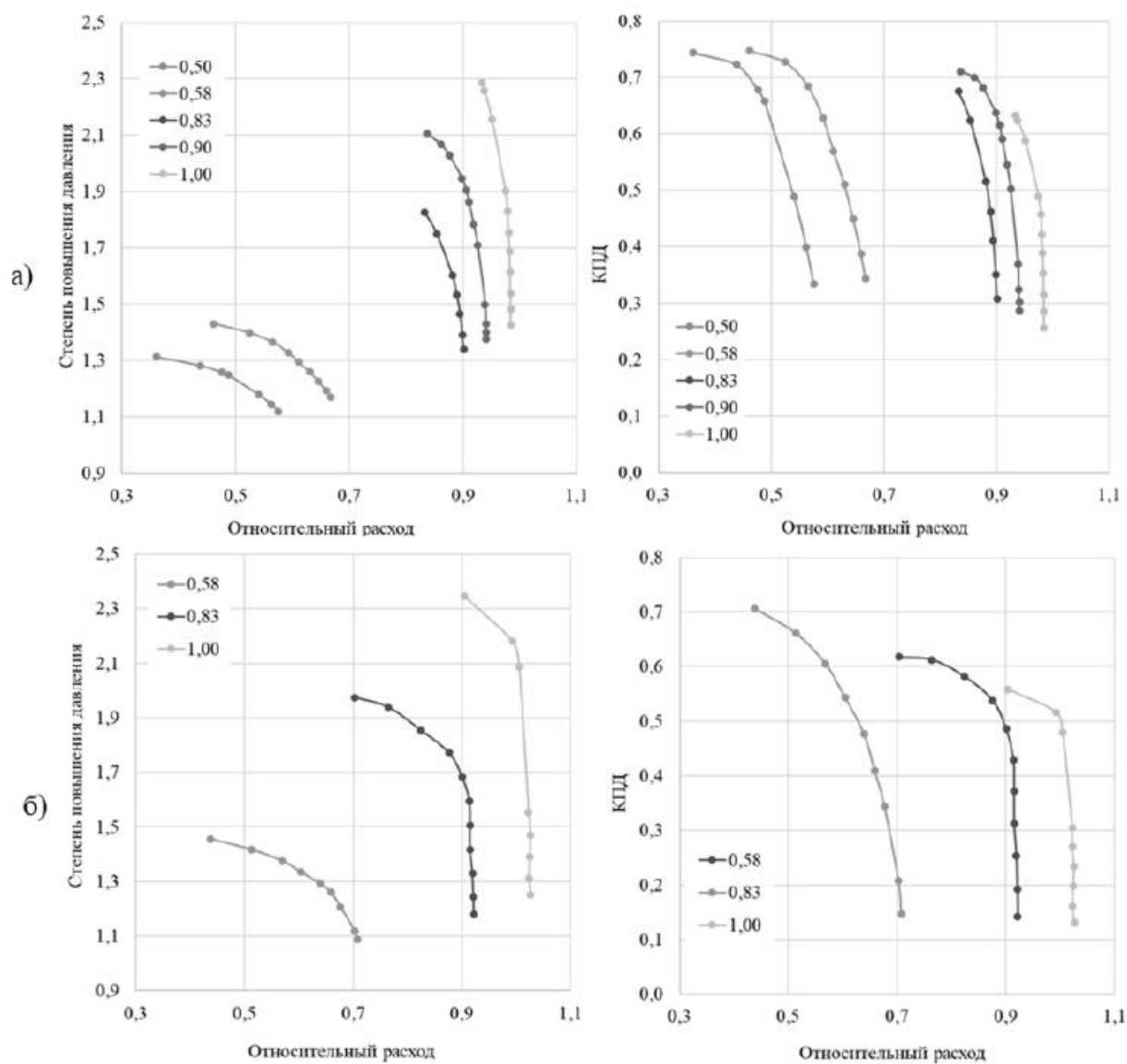
Рис. 3. Значения y^+ 

Рис. 4. Характеристика ступени компрессора:

а — расчет с ПК, построенным в CF Turbo; б — расчет с ПК, построенным в BladeGen

Полученная в результате визуализация течения в межлопаточном канале построенного в CF-Turbo колеса более плавная, количество зон отрыва (соответствует синему цвету) снизилось (рис. 5), что подтверждает повышение качества геометрической формы проточной части РК.

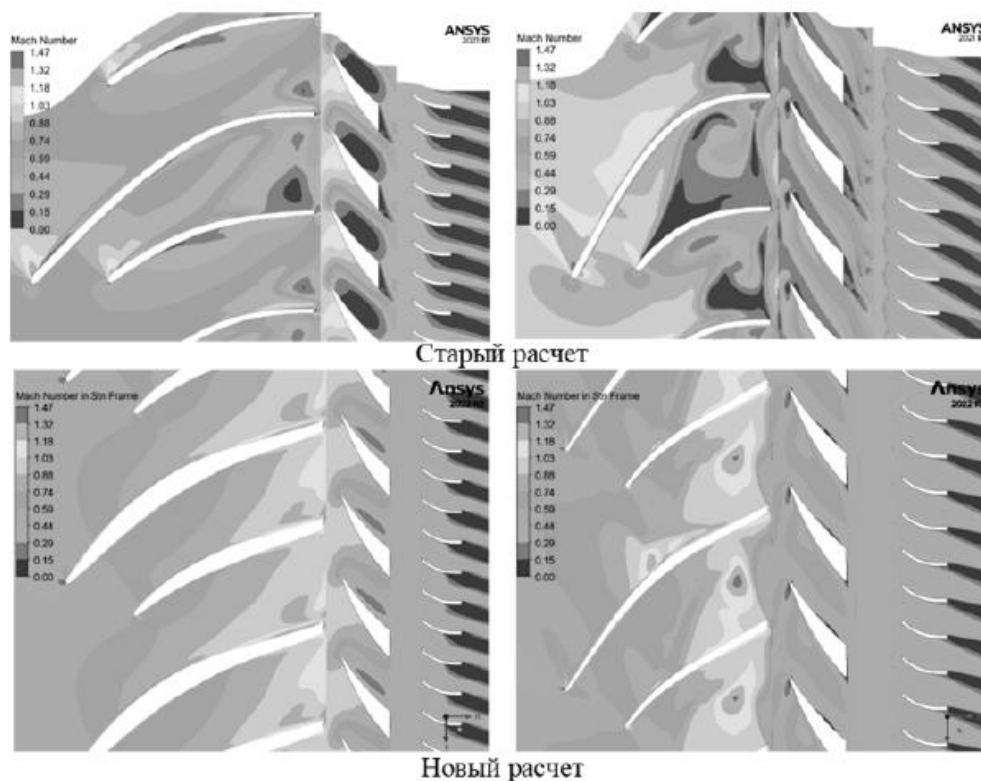


Рис. 5. Распределение чисел Маха в межлопаточном канале на номинальной частоте вращения на относительной высоте лопатки 0,5 (слева) и 0,9 (справа)

Обсуждение полученных результатов. Лучше всего уменьшение срывов потока с лопаток ЛД наблюдается на малой относительной высоте лопатки. При этом расходная скорость через лопаточный диффузор возросла, что положительно сказалось на эффективности работы ступени компрессора и запасе газодинамической устойчивости. С повышением частоты вращения возрастает влияние обратного вихря, возникающего под действием циркуляционного движения [7], и КПД падает.

Заключение. Проведенное исследование позволило получить компрессор с более высокой эффективностью, отвечающий современным требованиям. В дальнейшем данные из расчетов будут использованы для согласования компрессора со спроектированной под него турбиной.

Список источников

- [1] CFturbo. URL: <https://cfturbo.com> (дата обращения 27.08.2025).
- [2] Стецкая Т.А. Реверс-инжиниринг малоразмерного рабочего колеса центробежного компрессора. *Будущее машиностроения России. XV Всерос. конф.: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, т. 1, с. 476–480.

- [3] Стецкая Т.А., Ступоченко В.А., Костюченко А.В. Расчет характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора. *Будущее машиностроения России. XVII Всерос. конф.: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, т. 1, с. 358–362.
- [4] Стецкая Т.А. Расчет характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора с помощью ANSYS. *Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования. Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Казань, Казанский государственный энергетический университет, 2025, с. 2615–2618.
- [5] Молчанов А.М. *Термофизика и динамика жидкости и газа. Специальные главы.* Москва, 2019, 152 с.
- [6] Гилева Л.В., Аксенов А.А., Кожухов Ю.В., Петров А.Ю. Исследование влияния пристеночного параметра y^+ на результаты численного моделирования конфузорного течения во входном устройстве центробежного компрессора. *Вестник МАХ*, 2020, № 1, с. 27–33.
- [7] Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н. *Теория авиационных двигателей. Ч. 1.* Москва, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2005, 366 с.