



DOI: 10.18721/JEST.26408  
УДК 621.515

*Л.Н. Маренина<sup>1</sup>, О.А. Соловьёва<sup>1</sup>,  
Ю.Б. Галеркин<sup>1</sup>, Е.Ю. Попова<sup>1</sup>, В.Н. Каминский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> НПО "Турботехника",  
г. Протвино, Московская обл., Россия

## **РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Компьютерные программы первичного проектирования на основе математических моделей потерь напора и отклоняющей способности решеток А. Комарова используются на первом этапе создания проточной части осевых компрессоров. Для проведения газодинамического исследования с использованием CFD-методов необходимо создать расчётную модель проточной части, полученной в результате проектирования. В работе описаны этапы создания параметризованной расчётной модели четырехступенчатого осевого компрессора. Параметризация проведена таким образом, чтобы при проектировании проточной части в программе первичного проектирования полученная геометрия передавалась в программный комплекс ANSYS CFX. При копировании данных происходит автоматическое построение лопаток, меридионального контура и расчётных сеток. Полученная модель готова к проведению дальнейшего газодинамического расчёта. Использование параметризованной модели делает возможным проведение оптимизации с несколькими изменяемыми параметрами и разными критериями эффективности.

*Ключевые слова:* осевой трансзвуковой компрессор, параметризация, вычислительная газодинамика, первичное проектирование, ANSYS.

*Ссылка при цитировании:*

Маренина Л.Н., Соловьёва О.А., Галеркин Ю.Б., Попова Е.Ю., Каминский В.Н. Разработка параметризованной модели и расчет осевого компрессора энергетической установки // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 100–111. DOI: 10.18721/JEST.26408

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*L.N. Marenina<sup>1</sup>, O.A. Solovyeva<sup>1</sup>,  
Yu.B. Galerkin<sup>1</sup>, E.Yu. Popova<sup>1</sup>, V.N. Kaminsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> NPO "Turbotechnika", Protvino, Moscow region, Russia

## **DEVELOPMENT OF A PARAMETRIZED MODEL AND CALCULATION OF A POWER UNIT AXIAL COMPRESSOR**

Computer programs for primary design based on mathematical models of pressure losses and A. Komarov's model of flow deviation angle are used at the first stage of constructing axial compressors flow path. To conduct a gas-dynamics research using CFD methods, it is necessary to create a computational model of the flow path obtained as a result of the design. The paper

describes the main points of creating a parameterized design model of a four-stage axial compressor. The parameterization is carried out in a way to ensure that the geometry obtained by the primary flow path design program is transferred to the ANSYS CFX software package. When copying the data, the blades, meridional contour and computational grids are constructed automatically. The resulting model is ready for further gas-dynamics calculations. The use of the parameterized model enables optimization with several adjustable parameters and various criteria of efficiency.

*Keywords:* axial-flow compressors, parametrization, computational fluid dynamics, preliminary design, ANSYS.

*Citation:*

L.N. Marenina, O.A. Solovyeva, Yu.B. Galerkin, E.Yu. Popova, V.N. Kaminsky, Development of a parameterized model and calculation of a power unit axial compressor, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 100–111, DOI: 10.18721/JEST.26408

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Газодинамический расчет проточной части осевых компрессоров с использованием CFD-методов хорошо зарекомендовал себя в проектной практике. Зарубежные фирмы широко применяют современные подходы к расчету и проектированию компрессоров, в том числе цифровые. Они разрабатывают собственные математические модели и программы, используя для верификации как экспериментальные данные, так и хорошо известные коммерческие CFD-пакеты.

Программный комплекс оптимизации формы и размеров осевых компрессоров представлен в работах [1, 2]. Первичное проектирование осуществляется на основе одномерного расчёта на средней линии тока. Далее применяется двухмерный подход, в результате которого строятся треугольники скоростей на нескольких линиях тока по высоте лопатки, рассчитываются параметры потока. Несколько осевых компрессоров были оптимизированы при помощи данной программы, затем результаты расчетов по инженерным моделям были верифицированы в программе ANSYS CFX посредством CFD-расчетов.

Усовершенствованная модель расчета и проектирования трансзвуковых осевых компрессоров, основанная на двухмерных расчетах, представлена в работе [3]. Верификация модели основана на результатах экспериментальных исследований трансзвуковой осевой ступени и трехступенчатого компрессора P&W 3S1. Результаты программных расчетов были также сопоставлены с CFD-расчетом этих объектов.

Программы трехмерного инженерного анализа собственной разработки использованы при проектировании пятиступенчатого осевого компрессора в работе [4]. Оптимизация осуществляется изменением формы средней линии лопатки. Для последующего уточняющего анализа полученные координаты передаются в коммерческий CFD-пакет NUMECA.

Методы цифрового проектирования компрессоров активно разрабатываются и внедряются во многих странах, в том числе и в России. В работах [5], [6], [7] показана успешная реализация вычислительных методов применительно к неподвижным элементам центробежных компрессоров, однако CFD-моделирование центробежных компрессоров в целом пока представляет проблему [8], [9], [10]. Положительный опыт CFD-расчетов применительно к осевым турбинам показан в работах [11], [12], [13]. Однако CFD-пакеты не могут в полной мере заменить одномерные и двухмерные инженерные программы расчета и проектирования турбомашин, но хорошо зарекомендовали себя в качестве вспомогательного инструмента для создания более совершенных специализированных программ.

Компрессорная группа лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования» ЦНТИ СПбПУ использует в проектной практике ком-

пьютерные программы собственной разработки (РРОК), в основе которых лежат математические модели потерь напора и отклоняющей способности решеток А. Комарова [14]. Для окончательной доводки размеров и формы элементов спроектированной проточной части, получения наглядной картины течения, необходимой для качественного анализа полученных результатов, требуется проведение CFD-расчетов.

Целью данной работы является создание единого автоматизированного комплекса проектирования и CFD-расчета газодинамических характеристик осевых компрессоров. Необходимо связать программу первичного проектирования РРОК с рабочей средой Workbench программного комплекса ANSYS CFX. Получившийся комплекс позволит пользователю проводить CFD-расчеты газодинамических характеристик спроектированного варианта осевого компрессора в автоматическом режиме без необходимости построения 3Д моделей и расчетных сеток в ручном режиме.

### Методы и материалы

Для формирования единого программного комплекса расчета и проектирования осевых компрессоров и связи результатов первичного проектирования с программой проведения CFD-расчетов была проведена параметризация проточной части осевого компрессора. Исходная геометрия для построения получена в результате расчёта по программе первичного проектирования РРОК, которая доказала свою эффективность в исследовательской и проектной практике [15]. Программа позволяет анализировать газодинамические параметры элементарных лопаточных решеток осевых компрессорных ступеней в зависимости от выбранных проектировщиком исходных параметров проектирования:

- степени реактивности,
- коэффициента расхода,
- относительного шага решетки рабочего колеса,
- фактора диффузорности рабочего колеса,
- фактора диффузорности или относительного шага решетки направляющего аппарата.

В результате первичного проектирования определяются основные размеры меридиональной формы компрессора и его лопаток в 20 сечениях по высоте. На рис. 1 показана упрощенная схема ступени осевого компрессора (ОК) с указанием контрольных сечений, а также развертка на плоскость кольцевых лопаточных решеток с указанием лопаточных углов в том виде, в котором они представлены в программе первичного проектирования.

Для построения параметризованной модели использовалась программа DesignModeler программного комплекса ANSYS. Проектирование компрессора производится по 20 осесимметричным поверхностям тока, где расстояние от оси ротора определяется радиусом  $r_n$  (рис. 1а), таким образом, для построения одной лопатки необходимо построить 20 эскизов, каждый из которых является пересечением поверхности лопатки и осесимметричной поверхности тока. Каждый эскиз лопаток РК и НА определяется одинаковым набором параметров:  $Angle_{LE}$  и  $Angle_{TE}$  – входной и выходной лопаточные углы;  $B$  – хорда лопатки;  $B_f$  – положение максимальной толщины относительно входной кромки;  $delta$  – максимальная толщина профиля;  $R_{LE}$  и  $R_{TE}$  – радиусы скругления входной и выходной кромок. Входной направляющий аппарат (ВНА) имеет более сложную геометрию, для его построения необходимо указать дополнительный размер – положение начала участка постоянной толщины. Эскизы, используемые при построении лопаток, и условное обозначение параметров представлены на рис. 1в,г.

### Результаты

Параметризованная расчётная модель осевого компрессора, полученная в результате проведенной работы, позволяет легко осуществлять построение проточной части, используя геоме-

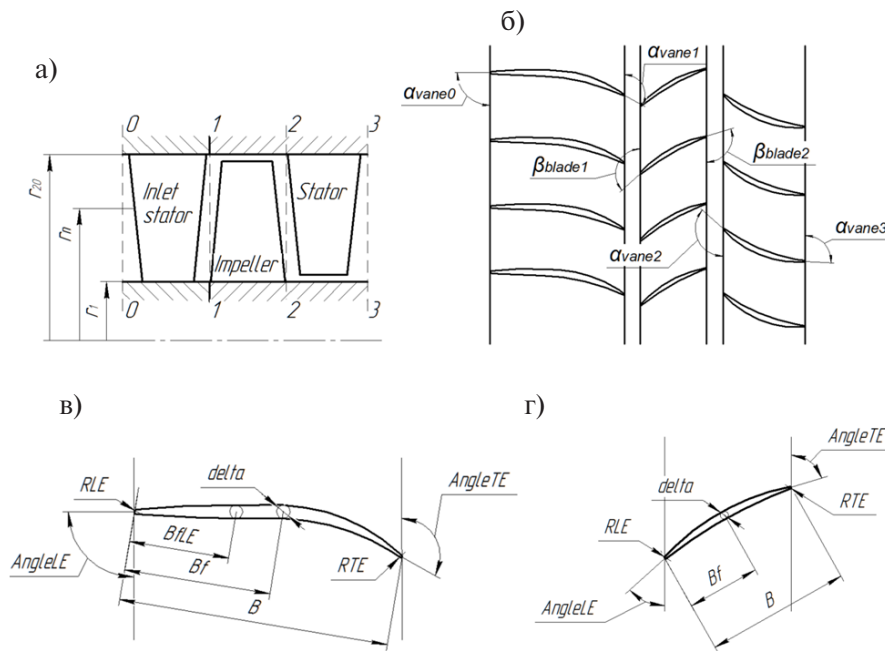


Рис. 1. Схема расположения контрольных сечений в меридиональной плоскости – а; развёртка на плоскость кольцевых лопаточных решеток – б; эскизы лопаток ВНА – в и ПК – г

Fig. 1. Layout of control sections in the meridional plane – а; blade-to-blade plane and the blade (vane) angles – б; sketches of the inlet stator vane – в and the impeller blade – г

трические данные из программы РРОК. Основные этапы построения расчетной модели описаны ниже.

Создание эскиза лопатки начинается с создания плоскости, параллельной плоскости XZ. Плоскость необходимо расположить на расстоянии от оси Z, равном соответствующему радиусу осесимметричной поверхности тока  $r_n$ . Это расстояние выносится в качестве первого параметра Workbench, для эскиза на первой поверхности тока оно обозначено как R1. Далее на эскизе создаются вспомогательные отрезки, которые необходимы для определения лопаточных углов. Углы отсчитываются от оси X, им присваиваются соответствующие названия (AngleLE1 и AngleTE1) и они также выносятся в качестве параметров (рис. 2а).

Средняя линия лопатки строится при помощи инструмента «дуга», задаётся условие касательности к построенным ранее отрезкам. Для указания толщины профиля используется окружность с центром на средней линии. Диаметр окружности обозначается delta1, выносится как параметр Workbench. Также, для определения положения лопатки относительно осей, задаётся совпадение центра окружности с центральной точкой эскиза. Элементы, которые окончательно определены в пространстве, подсвечиваются синим цветом. Зеленый цвет означает, что необходимо указать дополнительные размеры (рис. 2б).

На следующем этапе строится хорда профиля, её длина обозначается как B1. Из центра окружности опускается перпендикуляр к хорде, расстояние от точки их пересечения до входной кромки обозначается Bf1. Эта величина определяет положение максимальной толщины профиля (рис. 2в). В случае с лопаткой, задняя и передняя поверхности которой строятся при помощи одной дуги, Bf1 составляет половину от хорды профиля B1. Обе величины выносятся как параметры Workbench, в таблице параметров указывается их взаимосвязь:  $P3 = P2 * 0.5$  (рис. 2г), где P1...Pn – программное обозначение параметров с использованием сквозной нумерации.

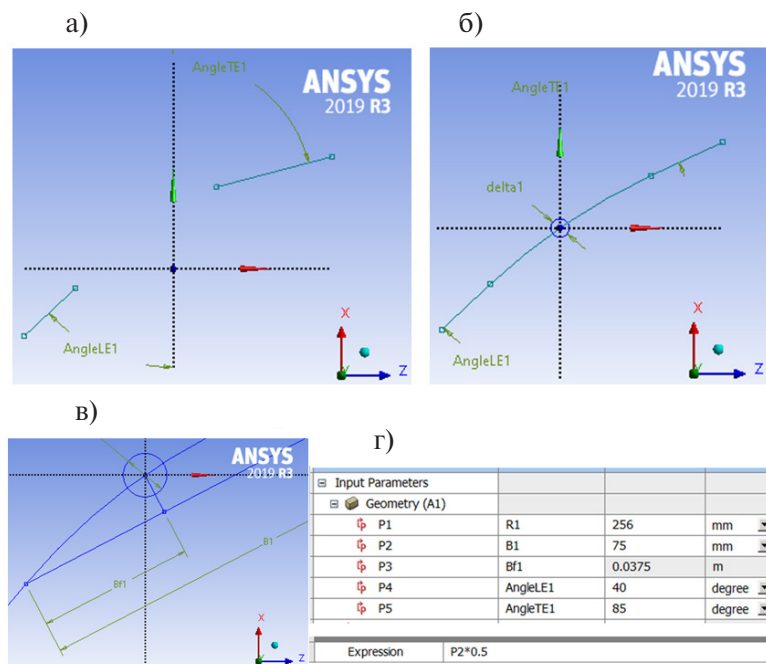


Рис. 2. Построение лопаточных углов в программе DesignModeler – а; построение окружности, определяющей толщину профиля – б; задание положения максимальной толщины профиля – в; задание взаимосвязи между параметрами – г  
 Fig. 2. Blade angles construction in the DesignModeler program – а; creation a circle that defines the profile thickness – б; setting the position of the maximum profile thickness – в; parameters relationship in the parameter table – г

На следующем этапе строится наружный контур лопатки. Для этого на эскизе создаются элементы закругления входной и выходной кромки в виде дуг, радиусы которых обозначаются соответственно RLE1 и RTE1 и выносятся в список параметров. Далее, также при помощи инструмента «дуга», строятся передняя и задняя поверхности лопатки, задаётся условие касательности к входной и выходной кромкам и к окружности delta1. Эскиз становится полностью определенным, указания дополнительных размеров не требуется. При изменении любого параметра лопатка автоматически перестраивается. Таким образом, мы получили параметризованный эскиз лопатки на первой осесимметричной поверхности тока, который подходит как для РК, так и для НА (рис. 3а). Как отмечалось ранее, для построения лопатки ВНА вводится дополнительный размер BfLE (рис. 1в).

Таким образом, для описания одного эскиза лопатки РК или НА используются 8 параметров, для ВНА – 9 параметров. В файле-шаблоне Excel необходимо расположить эти параметры в том же порядке, в каком они добавлялись в таблицу параметров Workbench (рис. 3б и 3в). Также необходимо обратить внимание, что в программе первичного проектирования отсчёт лопаточных углов от оси X в РК и НА различается (рис. 1б). Для учёта этого обстоятельства, в файле-шаблоне Excel углы для РК пересчитываются по формуле  $1800-\beta$ .

Для создания эскизов в оставшихся 19 сечениях необходимо повторить описанные выше действия, присваивая новым параметрам номер соответствующего сечения. Для ускорения построения можно воспользоваться функцией «Write script», записать последовательность действий и воспроизводить их при помощи действия «Run script». Когда все необходимые параметры будут вынесены в таблицу Workbench и заполнится файл-шаблон Excel, перестроение всех 20 эскизов лопаток можно будет производить одним действием – копированием данных из Excel в Workbench.

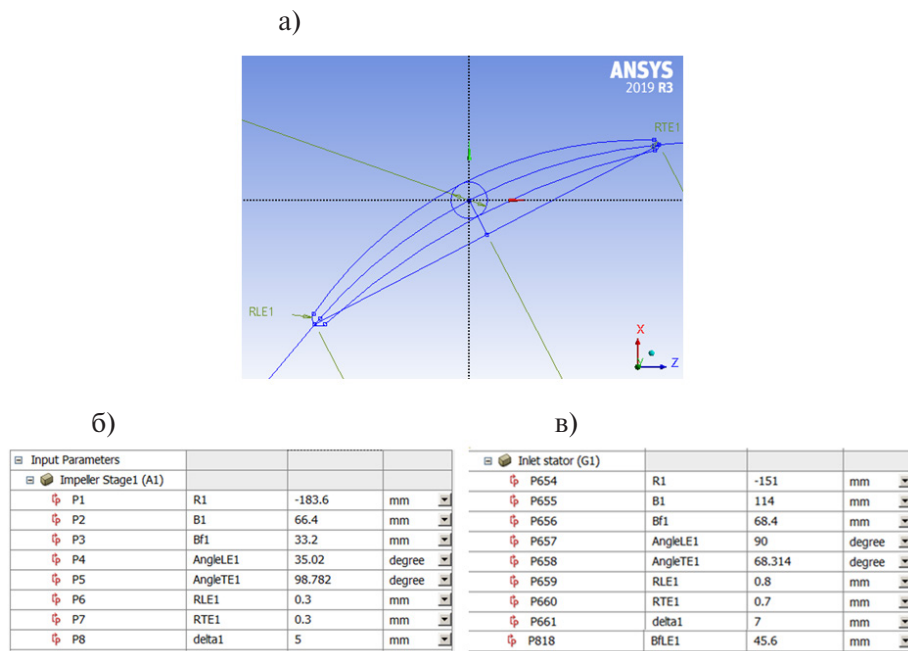


Рис. 3. DesignModeler, параметризованный шаблон лопатки для РК или НА – а; таблица параметров Workbench: РК – б и ВНА – в

Fig. 3. DesignModeler, parameterized blade template for impeller or stator – а; table of Workbench parameters: impeller – б, inlet stator – в

Построение трехмерного лопаточного профиля производится с помощью инструмента Skin/Loft путем соединения 20 эскизов лопаток одной поверхностью. Однако, для корректной работы функции «Skin» необходимо указывать эскизы, на которых нет дополнительных линий (вспомогательных объектов, использованных при построении лопаточного профиля). Также, во избежание ошибок, рекомендуется создавать операцию «Skin» отдельно для передней и задней поверхностей. С учетом вышесказанного, необходимо скопировать элементы лопаточного профиля на дополнительные эскизы, которые будут использоваться при построении поверхности лопатки (рис. 4а).

Для экспорта готовой лопатки в сеточный генератор TurboGrid необходимо задать геометрическую форму и положение втулки и периферии. С этой целью в отдельном окне DesignModeler строится и параметризуется общий меридиональный контур для всех четырех ступеней осевого компрессора. Координаты точек вдоль оси Y обозначаются как  $R_{i, hub}$  и  $R_{i, shg}$  для втулки и периферии соответственно, i – номер контрольного сечения. Положение точек вдоль оси Z задается размерами  $Z_{i, hub}$  и отсчитывается от плоскости XY. Расчёт размера  $Z_{i, hub}$  для каждого контрольного сечения описан в таблице параметров Workbench формулой, в которой учитывается осевая протяженность лопаток и величины зазоров между лопаточными решетками. Общий вид полученного меридионального контура представлен на рис. 4б.

Полученные из меридионального контура компрессора радиусы закругления втулочной и наружной поверхностей используются для построения меридионального обвода для каждой лопатки в отдельности. Для этого в файле DesignModeler с готовым трехмерным лопаточным профилем создаётся эскиз участка меридионального контура, по которому при помощи операции Revolve строится объемное тело. При создании функции «ExportPoints», необходимой для экспорта геометрии в сеточный генератор TurboGrid, выделяется поверхность пересечения этого тела с поверхностью готовой лопатки. Итоговый вид проточной части для лопаток ВНА, РК и НА первой ступени представлены на рис. 5.



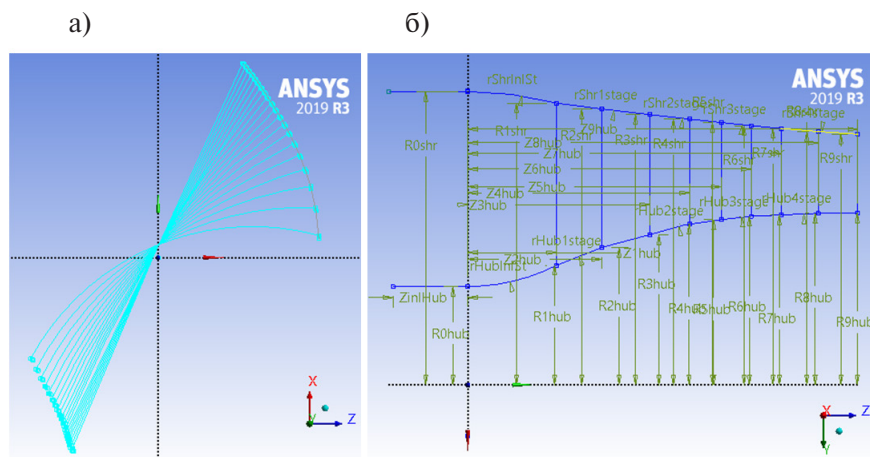


Рис. 4. DesignModeler, построение задней поверхности лопатки при помощи инструмента  $\text{Skin/Loft}$  – а; параметризованный меридиональный контур четырехступенчатого осевого компрессора – б

Fig. 4. DesignModeler, construction of the blade back surface with a tool  $\text{Skin/Loft}$  – а; parameterized meridional contour of a four-stage axial compressor – б

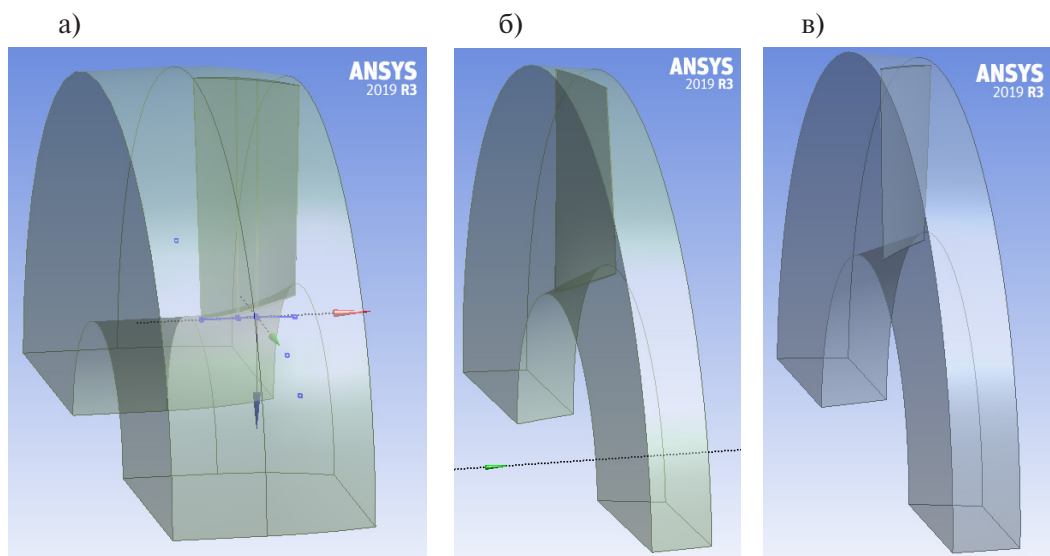


Рис. 5. DesignModeler, итоговый вид лопаток ВНА – а, ПК – б и НА – в первой ступени осевого компрессора

Fig. 5. DesignModeler, the final view of the inlet stator vane – а, impeller blade – б and stator vane – в of an axial compressor first stage

Для построения расчетной сетки использовалась программа TurboGrid. Готовая структурированная гексаэдральная сетка состоит из порядка 400 000 элементов для одного лопаточного венца. Для дальнейшего газодинамического расчета предполагается задание модели турбулентности SST (Shear Stress Transport), требующей значений величины  $y^+ < 10$ . С учетом этого величина первого пристеночного элемента составляет около 0,015 мм.

На следующем этапе необходимо выгрузить готовые сетки в программу CFX-Pre, где в полуавтоматическом режиме с использованием функции «Turbo Mode» происходит задание граничных условий для всех поверхностей. Общий вид полученной расчётной модели четырехступенчатого осевого компрессора представлен на рис. 6.

Представленная выше параметризованная модель была использована при выполнении работ по осевому компрессору энергетической установки по проекту «Разработка технических решений и прототипов устройств – камера сгорания, компрессор низкого давления для создания конкурентоспособных газовых турбин мощностью 25 МВт для газоперекачивающих агрегатов на основе цифровых двойников разрабатываемых устройств».

При расчёте использовалась модель турбулентности SST. Между неподвижными и вращающимися элементами использовался интерфейс «Stage» с осреднением скорости в окружном направлении. На входе задавалось полное давление 101325 Па и полная температура 288,15 К, на выходе – статическое давление 303500, частота вращения 10200 об/мин. На рис. 7 представлена структура потока на средней по высоте лопатки линии тока.

В результате CFD-расчёта четырехступенчатого осевого компрессора при описанных выше граничных условиях получены значения газодинамических параметров в виде КПД (84,3%) и отношения давлений компрессора (3,3).

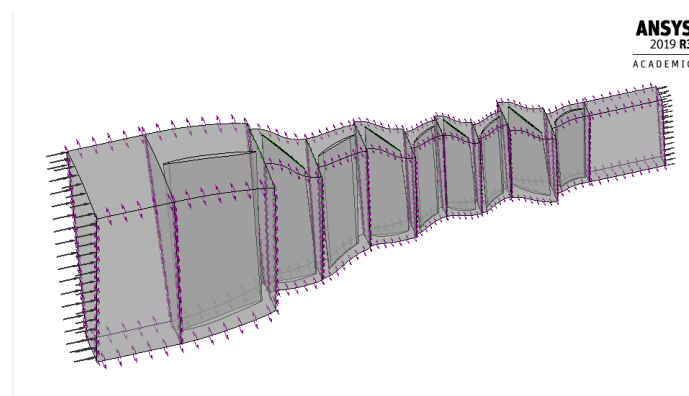


Рис. 6. ANSYS CFX-Pre, общий вид готовой расчётной модели четырехступенчатого осевого компрессора  
Fig. 6. ANSYS CFX-Pre, general view of the final design model of a four-stage axial compressor

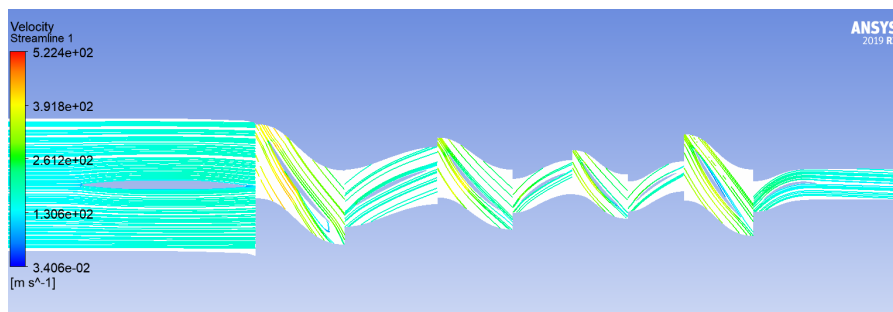


Рис. 7. ANSYS CFX-Post, структура потока на средней по высоте лопатки линии тока  
Fig. 7. ANSYS CFX-Post, streamlines on the blade-to-blade surface



### Обсуждение

Для эффективного проектирования и производства компрессорной техники требуются наиболее современные и полные математические модели, компьютерные программы, реализующие цифровые технологии проектирования. В результате работы было произведено формирование единого автоматизированного комплекса проектирования и CFD-расчета газодинамических характеристик осевых компрессоров. Созданный комплекс исключает необходимость пользователю производить трудоемкие ручные построения геометрии и расчетных сеток и ускоряет процесс проектирования новых осевых компрессоров. Данные из программы первичного проектирования передаются в созданные геометрические шаблоны программы DesignModeler и далее в сеточный генератор TurboGrid. Готовая параметризованная модель учитывает сложные взаимосвязи геометрических параметров, перестраивая проточную часть в автоматическом режиме. Результаты пробного расчета показали полную готовность модели к проведению дальнейших CFD-исследований. Дальнейшим этапом работ в этом направлении является верификация CFD-расчетов и выработка рекомендаций по их постановке и проведению, которая бы гарантировала получение достоверных результатов. В рамках выполнения работ по проекту планируется рассчитать семейство газодинамических характеристик компрессора при нескольких значениях частоты вращения.

### Заключение

В результате работы был сформирован единый автоматизированный комплекс, позволяющий проводить первичное проектирование по заданным параметрам и CFD-расчет газодинамических характеристик осевых компрессоров. Описанный выше алгоритм создания параметризованной модели проточной части четырехступенчатого осевого компрессора показал возможность подготовки объекта для проведения газодинамического расчета внутри программного комплекса ANSYS CFX. Были успешно проведены расчеты исследуемого объекта – четырехступенчатого осевого компрессора ГТД. Результаты расчетов показали эффективность предложенной параметрической модели, удобство ее использования. Применение параметризованной модели делает возможным проведение оптимизации с несколькими изменяемыми параметрами и разными критериями эффективности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10165). Расчеты проводились с использованием суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Banjac M.** Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part I – mean line design and example cases. / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.
- [2] **Banjac M.** Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part II – two-dimensional design and validation using CFD. / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.
- [3] **Li T.** Axial compressor performance prediction using improved streamline curvature approach. / T. Li, Y. Wu, H. Ouyang, X. Qiang / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.
- [4] **Zhang J., Zhou Zh., Cao H., Li Q.** Aerodynamic design of a multi-stage industrial axial compressor Advances in Engineering Software 116 (2018) 9–22.

[5] **Galerkin Y., Drozdov A., Solovyeva O.** Vaneless diffuser for low flow rate centrifugal compressor stage. – Proceedings of 13<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – Paper ID: ETC2019-329. – ETC13, Lausanne, Switzerland. – April 8-12, 2019.

[6] **Галеркин Ю.Б., Дроздов А.А., Соловьёва О.А.** Особенности работы безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней с разной меридиональной формой. Труды 16 Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. – СПб. – Том 1. – 2014. С. 171–178.

[7] **Marenina L., Galerkin Y., Soldatova K.** Computational fluid dynamics application for analysis of centrifugal compressor stage stator part. – International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 7 (6), pp. 656–661. DOI: 10.18178/ijmerr.7.6.656-661

[8] **Borovkov A.I., Voinov I.B., Nikitin M.A., Galerkin Yu.B., Rekstin A.F., Drozdov A.A.** Experience of performance modeling the single-stage pipeline centrifugal compressor. – Oil and Gas Engineering- AIP Conf. Proc. 2141. – Omsk. – Russia. – 2019, 030051-030051-10, <https://doi.org/10.1063/1.5122101>

[9] **Borovkov A.I., Voinov I.B., Galerkin Yu.B., Drozdov A.A., Soldatova K.V.** Experimental characteristic simulation for two-stage pipeline centrifugal compressor. International Conference on Compressors and their Systems 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012052

[10] **Borovkov A., Voinov I., Galerkin Yu., Nikiforov A., Nikitin M., Solovyeva O., Kabalyk K.** Issues of gas dynamic characteristics modeling: a study on a centrifugal compressor model stage. – E3S Web of Conferences 140, 06003 (2019). – International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006003>

[11] **Rakov G.L., Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Olennikov S.Y., Sebelev A.A., Sukhanov A.I., Schislyaev S.M.** A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia. International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Vol. 11, № 18, pp. 11721–11733.

[12] **Smirnov M.V., Sebelev A.A., Zabelin N.A., Kuklina N.I.** Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I. 12<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2017.

[13] **Sebelev A.A., Smirnov M.V., Borovkov A.I., Kuklina N.I., Rakov G.L.** Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part II: Method validation and final results. 13<sup>th</sup> European Turbomachinery Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2019.

[14] **Комаров А.П.** Исследование плоских компрессорных решеток / Лопаточные машины и струйные аппараты, Сб. статей, Вып. 2. М.: Машиностроение 1967. С. 67–110.

[15] **Попов Ю.А.** Совершенствование и анализ прочной части осевых компрессоров и ступеней с использованием результатов испытания лопаточных решеток. [текст]: дис...канд. техн. наук / Ю.А. Попов; СПбГПУ. – СПб., 2010.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАРЕНИНА Любовь Николаевна** – ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, M.Sc.  
E-mail: marenina\_ln@mail.ru

**СОЛОВЬЁВА Ольга Александровна** – старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: solovyeva.oa@yandex.ru

**ГАЛЕРКИН Юрий Борисович** – главный инженер проекта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: yuri\_galerkin@mail.ru

**ПОПОВА Елена Юрьевна** – спец. по учебно-методической работе, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: e.popova@list.ru

**КАМИНСКИЙ Валерий Наумович** – генеральный директор, НПО "Турботехника", д-р техн. наук.

E-mail: design@kamturbo.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 09.11.2020**

## REFERENCES

[1] **M. Banjac**, Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part I – mean line design and example cases / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT 2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.

[2] **M. Banjac**, Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part II – two-dimensional design and validation using CFD / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.

[3] **T. Li**, Axial compressor performance prediction using improved streamline curvature approach / T. Li, Y. Wu, H. Ouyang, X. Qiang / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.

[4] **J. Zhang, Zh. Zhou, H. Cao, Q. Li**, Aerodynamic design of a multi-stage industrial axial compressor Advances in Engineering Software 116 (2018) 9–22.

[5] **Y. Galerkin, A. Drozdov, O. Solovyeva**, Vaneless diffuser for low flow rate centrifugal compressor stage. – Proceedings of 13<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – Paper ID: ETC2019-329. – ETC13, Lausanne, Switzerland. – April 8-12, 2019.

[6] **Yu.B. Galerkin, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva**, Osobennosti raboty bezlopatochnykh diffuzorov tsen-trobeznykh kompressornykh stupeney s raznoy meridionalnoy formoy (Features of the operation of vaneless diffusers of centrifugal compressor stages with different meridional shapes). Trudy 16 Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii po kompressorostroyeniyu. – Spb. – Tom 1. – 2014. S. 171–178.

[7] **L. Marenina, Y. Galerkin, K. Soldatova**, Computational fluid dynamics application for analysis of centrifugal compressor stage stator part. – International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 7 (6), pp. 656–661. DOI: 10.18178/ijmerr.7.6.656-661

[8] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, M.A. Nikitin, Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, A.A Drozdov**, Experience of performance modeling the single-stage pipeline centrifugal compressor. – Oil and Gas Engineering – AIP Conf. Proc. 2141. – Omsk. – Russia. – 2019, 030051-030051-10, <https://doi.org/10.1063/1.5122101>

[9] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, Yu.B. Galerkin, A.A. Drozdov, K.V. Soldatova**, Experimental characteristic simulation for two-stage pipeline centrifugal compressor. International Conference on Compressors and their Systems 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012052

[10] **A. Borovkov, I. Voinov, Yu. Galerkin, A. Nikiforov, M. Nikitin, O. Solovyeva, K. Kabalyk**, Issues of gas dynamic characteristics modeling: a study on a centrifugal compressor model stage. – E3S Web of Conferences 140, 06003 (2019). – International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006003>

[11] **G.L. Rakov, V.A. Rassokhin, N.A. Zabelin, S.Y. Olennikov, A.A. Sebelev, A.I. Sukhanov, S.M. Schislyaev**, A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia. *International Journal of Environmental and Science Education*. 2016. Vol. 11, № 18, pp. 11721–11733.

[12] **M.V. Smirnov, A.A. Sebelev, N.A. Zabelin, N.I. Kuklina**, Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I. 12<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2017.

[13] **A.A. Sebelev, M.V. Smirnov, A.I. Borovkov, N.I. Kuklina, G.L. Rakov**, Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part II: Method validation and final results. 13<sup>th</sup> European Turbomachinery Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2019.

[14] **A.P. Komarov**, Issledovaniye ploskikh kompressornykh reshetok (Investigation of flat compressor cascades) / Lopatochnyye mashiny i struynnye apparaty, Sb. statey, Vyp. 2. M.: Mashinostroyeniye 1967. S. 67–110.

[15] **Yu.A. Popov**, Sovershenstvovaniye i analiz prochnoy chasti osevykh kompressorov i stupeney s ispolzovaniyem rezultatov ispytaniya lopatochnykh reshetok (Improvement and analysis of the flow path of axial compressors and stages using the results of vane cascade testing). [tekst]: dis...kand. tekhn. nauk. / Yu.A. Popov; SPbGPU. – SPb., 2010.

#### THE AUTHORS

**MARENINA Lyubov' N.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: marenina\_ln@mail.ru

**SOLOVYEVA Olga A.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: solovyeva.oa@yandex.ru

**GALERKIN Yuriy B.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: yuri\_galerkin@mail.ru

**POPOVA Elena Yu.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: e.popova@list.ru

**KAMINSKY Valeriy N.** – *NPO "Turbotekhnika"*.  
E-mail: design@kamturbo.ru

**Received: 09.11.2020**