



РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ТУРБОСТАРТЕРА ТС-21 ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ С ЦЕЛЬЮ ДАЛЬНЕЙШЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ

А. П. Шешуков, А. М. Яблоков, Л. Н. Маренина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

В работе представлены результаты 3D-сканирования геометрии проточной части центробежного компрессора ТС-21, а также результаты численного исследования течения вязкого газа в проточной части компрессора. Построены газодинамические характеристики компрессора на основе отсканированной оригинальной геометрии проточной части. Проведена оценка использования реверс-инжиниринга в энергетической и авиационной промышленности. Было выявлено, что помимо использования 3D-сканирования для лопаток рабочих колес необходимо проводить дополнительные операции, так как входные кромки лопаток получались более острые в результате погрешности обработки, вследствие чего возникает ударное обтекание и некорректное проектирование, модернизация промышленного и авиационного динамического оборудования.

Ключевые слова: центробежный компрессор, лопаточный диффузор, рабочее колесо, численное моделирование, характеристика, реверс-инжиниринг.

Для цитирования: Шешуков А. П., Яблоков А. М., Маренина Л. Н. Реверс-инжиниринг и численное моделирование течения вязкого газа ступени центробежного компрессора турбостартера ТС-21 для построения напорной характеристики с целью дальнейшей модернизации // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 4. С. 80–87. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-80-87. EDN: YCVDGE.



© Шешуков А. П., Яблоков А. М., Маренина Л. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

REVERSE ENGINEERING AND NUMERICAL MODELING OF THE VISCOUS GAS FLOW OF THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE OF THE TS-21 TURBO STARTER TO CONSTRUCT A PRESSURE CHARACTERISTIC FOR THE PURPOSE OF FURTHER MODERNIZATION

A. P. Sheshukov, A. M. Yablokov, L. N. Marenina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, Saint Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, 195251

In the research, reverse engineering of the centrifugal compressor stage of the TS-21 auxiliary power unit is carried out. The calculation is also modeled in the finite element method program taking into account all recommendations using computational gas dynamics methods. As a result, the compressor pressure characteristics are built for its further modernization. An assessment of reverse engineering for industrial tasks in modern realities is also carried out. Some shortcomings of 3D-scanning for turbomachine blades are identified, which greatly affect the CFD calculations and the correctness of the results.

Keywords: centrifugal compressor, vane diffuser, impeller, numerical modeling, characteristic, reverse engineering.

For citation: Sheshukov A. P., Yablokov A. M., Marenina L. N. Reverse engineering and numerical modeling of the viscous gas flow of the centrifugal compressor stage of the TS-21 turbo starter to construct



Введение

В современном мире компаниям приходится использовать передовые технологии для того, чтобы быть первыми на рынке спроса и предложений. В XX в. на замену стандартным методам анализа, обработки и воссоздания модели приходит реверс-инжиниринг или, как его еще называют, метод обратного проектирования. Еще несколько десятилетий назад различные производители и заводы копировали и заимствовали особенности выпускаемой продукции у конкурентов для получения новых знаний в производстве и для усовершенствования своих изделий. На сегодняшний день технический прогресс достиг настолько высокого уровня, что если сравнить реверс-инжиниринг буквально десять лет назад и сейчас, то это два совершенно разных метода по точности и возможности обработки объектов.

Реверс-инжиниринг активно применяется во многих отраслях промышленности. Его используют для решения различных задач в технологических процессах модернизации и разработки. Существует два наиболее распространенных направления применения обратного проектирования в энергетическом машиностроении:

1. Импортзамещение энергетических машин [1, 2].

Сейчас на Россию наложено беспрецедентное количество санкций со стороны западных стран, которые в значительной степени меняют процессы в экономике, включая энергетику. Многие компании, связанные с добычей газа и нефти, используют иностранные технологии, так как техника, купленная несколько лет назад, нуждается в техническом обслуживании и профилактике [3]. Для решения этих проблем отечественная промышленность стала активно применять обратный инжиниринг, чтобы упростить и удешевить замену комплектующих эксплуатируемых промышленных объектов.

2. Модернизация уже имеющихся энергоустановок [4].

Одной из главных задач обратного проектирования является воссоздание уже готовой модели для ее дальнейшей доработки в рамках улучшения определенных характеристик.

В последнее время повышается востребованность организаций, занимающихся модернизацией энергетического и нефтегазового оборудования для крупных фирм.

В связи с этим стоит вопрос оценки возможностей обратного инжиниринга в задачах модернизации оборудования и создания математических моделей отсканированных изделий для проведения различных численных исследований.

Следовательно, цель исследования — построение математической модели одноступенчатого центробежного компрессора ТС-21 для дальнейшей модернизации, а также получение газодинамических характеристик методами вычислительной гидродинамики и оценка использования реверс-

инжиниринга для задач промышленности в области машиностроения.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран одноступенчатый центробежный компрессор турбостартера ТС-21. Турбостартер ТС-21 предназначен для раскрутки ротора маршевого двигателя в ходе его запуска [5]. Турбостартер представляет собой двухвальный газотурбинный двигатель со свободной турбиной. Вал турбины компрессора и вал свободной турбины вращаются отдельно друг от друга, турбина компрессора вращается с частотой 50 500 об/мин. На таких оборотах вспомогательная силовая установка работает не больше 55 сек, чего вполне достаточно для раскрутки ротора основного двигателя. Холодная часть ТС-21 состоит из основных элементов: электростартера, ротора турбокомпрессора, корпуса компрессора, диффузора.

В данной модификации турбостартера используется центробежный компрессор с осерадиальным рабочим колесом типа «радиальная звезда», которое состоит из вращающегося направляющего аппарата и радиального колеса с гиперболическим диском. В рабочем колесе 20 лопаток.

Следом за колесом компрессора идет поворотное колено с осевым выходом к диффузору. Перед камерой сгорания для спрямления потока в осевом направлении установлен лопаточный диффузор, состоящий из 16 основных и 16 сплитерных лопаток. Забор воздуха в ступень осуществляется при помощи входной части с радиальным входом. После прохождения через ступень компрессора давление газа достигает 2,5 кг/см². На рис. 1 приведена схема проточной части компрессора в меридиональном сечении.

Для построения цифровой модели проточной части исследуемого центробежного компрессора применялось трехмерное сканирование.

Сканирование объекта подразумевает под собой использование специального оборудования — 3D-сканера. 3D-сканер — устройство, предназначенное для анализа физического объекта и получения его трехмерной модели [6].

Существует два основных вида 3D-сканера — контактный и бесконтактный, которые отличаются между собой методами сканирования.

Контактные используют так называемый «щуп», при помощи которого физически измеряют базовые плоскости и поверхности. Это позволяет максимально точно определить геометрию объекта и построить 3D-картину.

Бесконтактные лазеры используют в своем арсенале специальный лазер, который на расстоянии считывает точки с поверхности сканируемого объекта и переносит их в специальную программу для дальнейшей обработки. Один из главных плюсов бесконтактных лазеров заключается в том, что при помощи него можно отсканировать различные криволинейные поверхности.

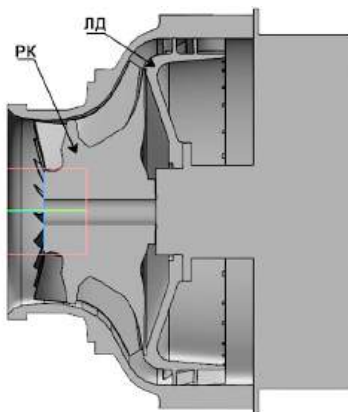


Рис. 1. Сборка ступени центробежного компрессора в программе Kompas-3D
Fig. 1. Assembly of a centrifugal compressor stage in the Kompas-3D program

Также сканеры делятся на основные типы:

1. *Ручные* — простые, удобные, компактные и не требующие особых навыков. Позиционирование производится по специальным меткам. Технические возможности таких сканеров ограничены ввиду их набегающей погрешности измерений.

2. *3D-сканеры для координатно-измерительных «рук»* — значительно расширяют функционал измерительных «рук», быстро и легко устанавливаются на шарнир манипулятора типа «рука», обеспечивают высокоскоростную прямую оцифровку поверхностей и элементов деталей с высоким разрешением.

3. *Система «Трекер-сканер»* — трекер динамически отслеживает сканер благодаря трекинговым меткам; нет необходимости в прикреплении маркеров к детали. Вычислительный комплекс рассчитывает положение сканера относительно детали исходя из маркеров на нем самом.

4. *Стационарные координатно-измерительные машины* — тяжелые, требовательные к вибрациям (развязанный фундамент для предотвращения передачи внешних вибраций на машину), стационарно размещенное оборудование для измерения в пространстве геометрии и размеров объекта. Могут сканировать сразу большое количество объектов за короткое время, применяются исключительно на производстве.

Для реверс-инжиниринга простой геометрии можно воспользоваться ручными измерительными средствами, такими как штангенциркуль, микрометр, нутромер и т. д. При работе с относительно большими и сложными деталями, поверхность которых замерить простыми способами не представляется возможным, применяют автоматизированные измерительные инструменты. При использовании технологий 3D-сканирования форма детали преобразуется в математическую модель, состоящую из огромного облака точек. Далее результаты измерений передаются в виде определенных файлов фасетной 3D-модели в CAD, CAE или CAM системы для дальнейшей обработки в зависимости от задач [6, 7].

Для получения твердотельной модели и результатов численного моделирования ступени центробежного компрессора были использованы несколько видов сканеров:

1. *Faro Quantum S* (Швейцария) — одна из трех модификаций «руки», которая отличается повышенной точностью для особо точных измерений.



Рис. 2. 3D-сканер марки CREAFORM
Fig. 2. CREAFORM 3D-scanner



Рис. 3. Этап сканирования лопаточного диффузора
Fig. 3. Scanning stage of the blade diffuser

2. *Hexagon Absolute Arm* (Франция) — портативная координатно-измерительная машина, предназначенная для измерений геометрических размеров объекта в условиях производства и лаборатории. Имеет схожие характеристики с Faro.

3. *CREAFORM METRASCAN Black Elite* (Канада) — система «Трекер-сканер». Отличается высокой скоростью сканирования и быстрой настройкой. Имеет более высокую точность, но меньшую разрешающую способность и ряд ограничений по сравнению с предыдущими координатно-измерительными машинами типа «рука», вызванными требованием оптической видимости сканера для трекера.

На рис. 2 представлен 3D-сканер CREAFORM METRASCAN Black, который применялся для создания цифровых моделей корпусных деталей. Рабочее колесо и лопаточный диффузор были отсканированы при помощи Faro Quantum S и Hexagon Absolute Arm.

Сканирование лопаточных частей компрессора производилось со всех сторон по два раза, после чего полученные результаты накладывались друг на друга в программе Geomagic Wrap. На рис. 3 представлен этап снятия геометрии с лопаточного диффузора. В результате получившиеся облака то-

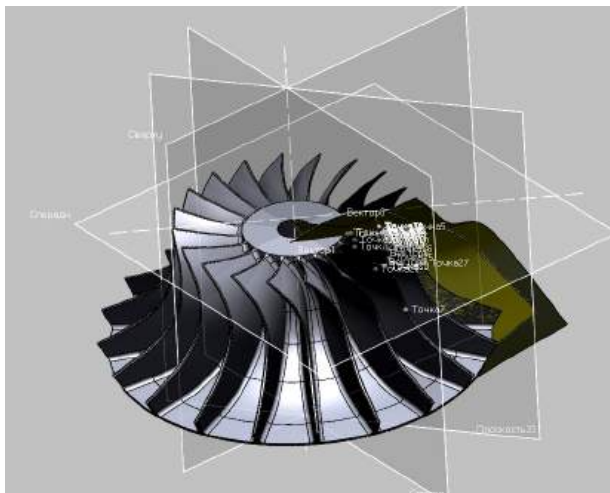


Рис. 4. Осерадиальное рабочее колесо с огибающими лопатку поверхностями
Fig. 4. Axial-radial impeller with enveloping surfaces of the blade

чек при соединении двух сканов достигли высокой точности, что говорит об удачном применении реверс-инжиниринга для снятия формы лопаток турбомашин [8–11].

В ходе сканирования было выявлено, что в месте соединения ВНА и радиального колеса есть неровные стыки из-за погрешности производства деталей. В целях исследования численного моделирования было решено сгладить неровности для более плавной геометрии.

В результате работы были получены необработанные полигональные модели всех элементов компрессора для получения твердотельных моделей в ПО Geomagic Design X.

Следующий этап работы — обработка полученных данных в программе Geomagic Design X. По окончании обработки результаты будут загружены в формат файла STP для моделирования математической модели и численного эксперимента в ПО с использованием метода контрольных объемов. На рис. 4 представлена твердотельная обработанная модель осерадиального рабочего колеса компрессора.

После получения геометрии элементов компрессора следует этап математического моделирования численного эксперимента в ПО с использованием метода контрольных объемов.

Первым шагом любых газодинамических CFD исследований является работа с геометрией исследуемого объекта. Для начала воспользуемся модулем Geometry, куда выгружаем файл STP с обработанной цифровой моделью. Основной задачей в данном модуле является построения меридионального контура проточной части компрессорной ступени для подпрограммы Turbogrid [12]. Для начала воспользуемся функцией Sketch Projection для того, чтобы построить проекцию нашего будущего скетча проточной части, затем выставляем нужные нам рамки входа и выхода в интересующем нас контуре. Далее воспользуемся командой FlowPath и сразу же применим опцию ExportPoints с целью выделения поверхностей лопатки и для её дальнейшего импорта. На рис. 5 представлен скетч FlowPath, построенный в модуле Geometry.

В конечном итоге сборочная модель проточной части компрессора была готова для последующе-

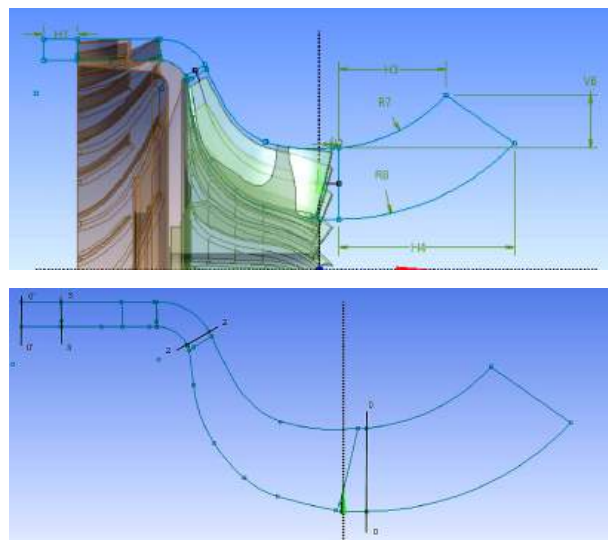


Рис. 5. Эскиз FlowPath всей проточной части и схема расположения сечений для снятия параметров потока
Fig. 5. FlowPath sketch of the entire flow path and the layout of sections for taking flow parameters

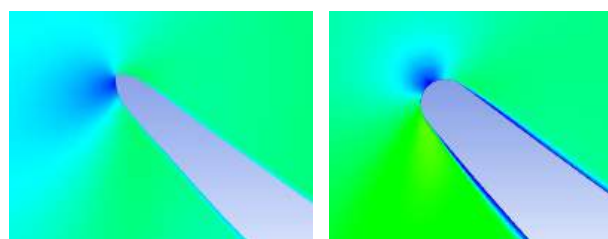


Рис. 6. Входная кромка лопатки рабочего колеса:
а — до обработки; б — после обработки

Fig. 6. Leading edge of the impeller blade before and after machining: a — before machining; б — after machining

го переноса ее в сеточный генератор — Turbogrid. Также стоит отметить, что входные кромки лопаток после обработки в ПО Geomagic Design X получились острые, из-за чего потребовалось использовать дополнительную функцию Cad Import, чтобы их сгладить, так как это очень сильно влияет на расчеты в будущем [4]. На рис. 6 представлена входная кромка лопатки рабочего колеса компрессора до и после использования Cad Import. Аналогичные операции были проделаны с лопаточным диффузором.

Одним из главных этапов построения численного эксперимента является создание сетки проточной части в подпрограмме Turbogrid. Основной проблемой в построении сетки выступает грамотное выставление сгущения в области твердых стенок [13]. Воспользуемся опцией First element offset. Для предварительного расчета было использовано значение 0,02 мм, в последующих вычислениях путем проверки параметра y^+ условились уменьшить это значение в 10 раз. Параметр y^+ должен быть меньше 2, так как была выбрана низкорейнольдсовая модель турбулентности [14]. Более того, необходимо выставить зазор в рабочем колесе, куда будет перетекать газ во время вращения. Выставим его равным 0,5 мм.

Таким образом, были созданы сетки для лопаточного диффузора и рабочего колеса центробежного компрессора в подпрограмме Turbogrid. Расчетные

сетки рабочего колеса и лопаточного диффузора составили 2,2 и 1,9 миллиона элементов соответственно. Также были приняты во внимание все общеизвестные рекомендации к построению [14]. Совместно с этим был построен входной канал простой геометрии в модуле ICEM CFD с количеством элементов около 200 тыс.

Завершающей стадией осуществления численного исследования представляет собой задание граничных условий в модуле CFX [13]. Для начала разбиваем нашу расчетную модель на области, так называемые Domains. В каждом домене ставим рабочее тело — идеальный газ. Далее задаем вращение рабочему колесу с определённой частотой оборотов. После этого переходим во вкладку Fluid Models и выбираем два параметра: Total Energy — для учета высокоскоростных энергетических эффектов; Shear Stress Transport — в качестве универсальной модели турбулентности для задач устойчивости и точности разрешения пограничного слоя [14]. В области входа зададим полное давление и температуру, а на выходе — массовый расход. На граничащих поверхностях между доменами выставим значение Frozen Rotor. Опция Rotation Periodicity в программе ANSYS CFX позволяет задать периодические граничные условия на боковых стенках проточной части, симметричных относительно оси вращения. Завершающим действием во вкладке Solver Control выставляем нужное нам количество итераций и масштаб времени.

Далее в приложении Solution выставляем количество ядер своего процессора и начинаем расчет.

В результате, была построена CFD-модель всей ступени центробежного компрессора, которую можно использовать для численного моделирования течения вязкого газа и построения характеристики.

Результаты

Основная цель данной работы заключается в построении напорной характеристики центробежного компрессора ТС-21 изначальной и доработанной геометрии для сравнения и модернизации. Перед тем как переходить к самой характеристике, необходимо выбрать контрольные сечения, в которых будут сняты параметры потока. На рис. 5 представлены контрольные сечения для снятия параметров потока.

Ключевыми параметрами является давление и температура (полные и статические), а также скорость в абсолютном движении.

При обработке результатов была использована методика, описанная Ю. Б. Галеркиным, при помощи которой были рассчитаны основные параметры [15]:

- 1) условный коэффициент расхода:

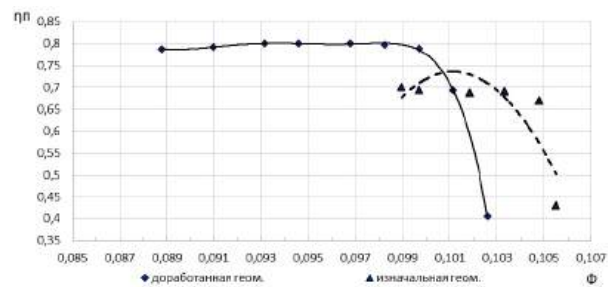
$$\Phi = \frac{4\bar{V}_0}{\pi D_2^2 U_2},$$

где \bar{V}_0 — объемный расход в сечении, м³/с; D_2 — диаметр рабочего колеса, м; U_2 — окружная скорость на диаметре D_2 , м/с.

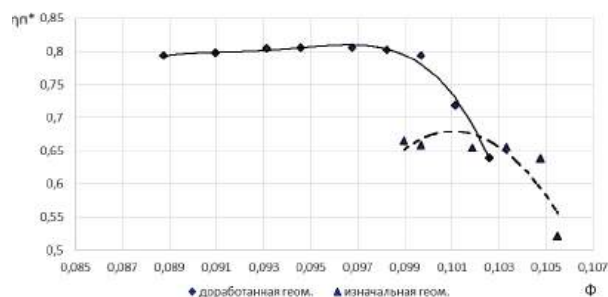
- 2) коэффициент политропного напора по статическим параметрам:

$$\Psi_n = \frac{h_n}{U_2^2}.$$

Причем h_n — политропный напор, кДж/кг.



а



б

Рис. 7. Графики зависимостей политропных КПД от условного коэффициента расхода: а — по полным параметрам; б — по статическим параметрам
Fig. 7. Graphs of the dependences of polytropic efficiencies on the conditional flow coefficient: а — for total parameters; б — for static parameters

- 3) коэффициент политропного напора с учетом динамической составляющей:

$$\Psi_n^* = \frac{h_n^*}{U_2^2};$$

- 4) коэффициент внутреннего напора:

$$\Psi_i = \frac{h_i}{U_2^2}.$$

К тому же h_i — внутренний напор, кДж/кг.

$$h_i = i_0^* - i_{0'}^*$$

i^* — полные энтальпии потока.

Также были посчитаны коэффициенты полезного действия по статическим и полным параметрам:

$$\eta_n = \frac{h_n}{h_i - h_d},$$

$$\eta_n^* = \frac{h_n^*}{h_i}.$$

На рис. 7 и 8 представлены графики зависимостей КПД и коэффициента политропного напора по полным и статическим параметрам, которые были посчитаны вручную.

Заключение

В результате работы был проведен реверс-инжиниринг и построены характеристики центробежного компрессора турбостартера для сравнения и модернизации дальнейшей доработки двигателя. Было выявлено, что помимо использования 3D-сканирования для лопаток рабочих колес необходимо проводить дополнительные операции,

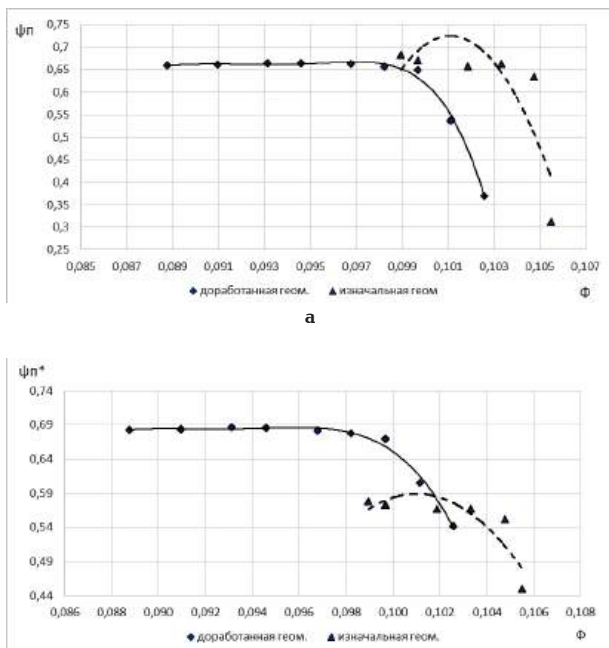


Рис. 8. Графики зависимостей коэффициента политропного напора от условного коэффициента расхода:
а — по полным параметрам;
б — по статическим параметрам
Fig. 8. Graphs of the dependence of the polytropic pressure coefficient on the conditional flow coefficient:
а — for total parameters; б — for static parameters

так как входные кромки лопаток получались более острые в результате погрешности обработки, из-за чего может возникать ударное обтекание и некорректное проектирование, модернизация промышленного и авиационного динамического оборудования. В данном эксперименте наглядно видно смещение всей характеристики в сторону большего расхода и сильное снижение КПД, что говорит о возрастающих ударных потерях при использовании острых кромок на лопатках рабочего колеса и диффузора. Стоит отметить, что реверс-инжиниринг — относительно новый способ проектирования, и указанный метод только начинает получать популярность и признание среди представителей энергетической, нефтегазовой и авиационной отраслей. Последующая модернизация компрессорной части ТС-21 целесообразна, так как позволит увеличить КПД и давление в ступени центробежного компрессора.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при поддержке компании ООО «Инженерно-технологические решения». Также выражаем благодарность старшему инженеру-конструктору А. А. Евтушенко.

The research was supported by LLC "Engineering and Technological Solutions". The authors also express their gratitude to A. A. Evtushenko, Senior Design Engineer of the company.

Список источников / References

1. Сон П. Ю. Перспективы и вызовы импортозамещения в российской энергетике // Экономические исследования и разработки. 2023. № 4-2. С. 93–100. EDN: OVXPPD.
2. Son P. Yu. Perspektivy i vyzovy importozameshcheniya v rossiyskoy energetike [Prospects and challenges of import

substitution in the Russian energy sector] *Ekonomicheskiye issledovaniya i razrabotki. Economic Development Research Journal*. 2023. No. 4-2. P. 93–100. EDN: OVXPPD. (In Russ.).

3. Рубанова К. А. Исследование применения обратного инжиниринга российскими промышленными компаниями // Human Progress. 2024. Т. 10, № 1. С. 3. DOI: 10.34709/IM.1101.17. EDN: QOZBOA.

Rubanova K. A. Issledovaniye primeneniya obratnogo inzhiniringa rossiyskimi promyshlennymi kompaniyami [Research on the reverse engineering usage by Russian industrial companies]. *Human Progress*. 2024. Vol. 10, no. 1. P. 3. DOI: 10.34709/IM.1101.17. EDN: QOZBOA. (In Russ.).

4. Винниченко А. В., Назаревич С. А. Применимость модели обратного инжиниринга для задач унификации в процессах системного проектирования машиностроительных предприятий // Science and Education: Problems and Innovations: сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 34–39. EDN: VCJWGW.

Vinnichenko A. V., Nazarevich S. A. Primenimost' modeli obratnogo inzhiniringa dlya zadach unifikatsii v protsessakh sistemnogo proyektirovaniya mashinostroitel'nykh predpriyatiy [Applicability of the reverse engineering model for unification problems in the processes of system design of machine-building enterprises]. *Science and Education: Problems and Innovations*. Penza, 2020. P. 34–39. EDN: VCJWGW. (In Russ.).

5. Сарманаева А. Ф., Соколов Н. В., Паранина О. Ю. [и др.]. Проблемные вопросы и пути их решения при проведении реверс-инжиниринга узлов компрессорных машин // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 53–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-53-60. EDN: BUMOUY.

Sarmanayeva A. F., Sokolov N. V., Paranina O. Yu. [et al.]. Problemnyye voprosy i puti ikh resheniya pri provedenii revers-inzhiniringa uzlov kompressornykh mashin [Problematic issues and ways to solve them during reverse engineering of compressor design unit]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 53–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-53-60. EDN: BUMOUY. (In Russ.).

6. Кузьмин Н. В. Разработка мобильного стенда для запуска ТС-21 // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2022. № 1 (26). С. 47–52. EDN: ZOISYW.

Kuzmin N. V. Razrabotka mobil'nogo stenda dlya zapuska TS-21 [Development of a mobile stand for launching TS-21]. *Molodezhnyy Vestnik Ufimskogo Gosudarstvennogo Aviatcionnogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2022. No. 1 (26). P. 47–52. EDN: ZOISYW. (In Russ.).

7. Хейфец М. Л., Грецкий Н. Л., Хилько Д. Н. Реверс-инжиниринг в аддитивном и ремонтном производстве сложнопрофильных и крупногабаритных изделий // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. тр. конф. Минск: РУП «Издательский дом «Белорусская наука», 2023. С. 149–156. EDN: GZIYCW.

Kheyfets M. L., Gretskey N. L., Khilko D. N. Revers-inzhiniring v additivnom i remontnom proizvodstve slozhno-profil'nykh i krupnogabaritnykh izdeliy [Reverse engineering in additive and repair manufacturing of complex and large-sized products]. *Perspektivy razvitiya additivnykh tekhnologiy v Respublike Belarus'. Opportunities for the Development of Additive Technologies in the Republic of Belarus*. Minsk, 2023. P. 149–156. EDN: GZIYCW. (In Russ.).

8. Тараховский А. Ю., Смирнов И. А. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 18. С. 91–97. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97. EDN: KRSOSS.

Tarakhovskiy A. Yu., Smirnov I. A. Revers-inzhiniring kolenchatogo vala kompressora [Reverse engineering of

the compressor crankshaft]. *Transportnoye, gornoye i stroitel'noye mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo. Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2023. No. 18. P. 91 – 97. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97. EDN: KRSOSS. (In Russ.).

8. Wang P., Zhang M. M., Zangeneh M. A. Novel optimisation of a transonic centrifugal impeller based on 3D inverse design approach. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2023: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2023. Vol. 13D. V13DT35A019. DOI: 10.1115/GT2023-103145.

9. Oliveira R., Zhang L., Zangeneh M. Tandem-blade centrifugal compressor design and optimization by means of 3D inverse design. *European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*. 2023. DOI: 10.29008/ETC2023-270.

10. Скрипничук Е. В., Решетникова Е. С. Реверсивный инжиниринг // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2021. № 20. С. 238 – 245. EDN: MRAOWG.

Skripnichuk E. V., Reshetnikova E. S. Reversivnyy inzhiniring [Reverse engineering]. *Tekhnologii Metallurgii, Mashinostroyeniya i Materialoobrabotki*. 2021. No. 20. P. 238 – 245. EDN: MRAOWG. (In Russ.).

11. Sasa D. A., Tarakhovskiy A. Yu. Создание методики повышения производительности процесса создания твердотельной 3D-модели из реального объекта с помощью оптического сканера // Современные технологии: проблемы и перспективы: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых. Севастополь, 2021. С. 49 – 55. EDN: NLHFGJ.

Sasa D. A., Tarakhovskiy A. Yu. Sozdaniye metodiki povysheniya proizvoditel'nosti protsesssa sozdaniya tverdotel'noy 3-D modeli iz real'nogo ob'yekta s pomoshch'yu opticheskogo skanera [Creating a technique for improving the performance of the process of creating a solid-state 3-D model from a real object using an optical scanner]. *Sovremennyye Tekhnologii: Problemy i Perspektivy*. Sevastopol, 2021. P. 49 – 55. EDN: NLHFGJ. (In Russ.).

12. Филимонов Е. В., Маренина Л. Н., Дроздов А. А., Садовский Н. И. Опыт применения 3Д-сканирования и CFD-расчетов для исследования течения в рабочем колесе многовального центробежного компрессора и проведения оптимизации // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 69 – 79. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-69-79. EDN: EKLOEM.

Filimonov E. V., Marenina L. N., Drozdov A. A., Sadovskiy N. I. Opyt primeneniya 3D-skanirovaniya i CFD-raschetov dlya issledovaniya techeniya v rabochem kolese mnogoval'nogo tsentrobezhnogo kompressora i provedeniya optimizatsii [Experience of applying 3D-scanning and CFD calculations to study and optimization the flow in the impeller of a multi-shaft centrifugal compressor]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no 3. P. 69 – 79. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-69-79. EDN: EKLOEM. (In Russ.).

13. Данилишин А. М. Повышение эффективности турбохолодильных машин с центробежными компрессорными ступенями концевой типа: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2023. 294 с. EDN: EIBGKB.

Danylyshyn A. M. Povysheniye effektivnosti turbokholodil'nykh mashin s tsentrobezhnyimi kompressornymi stupenyami kontsevoogo tipa [Increasing of the turborefrigerating machines efficiency with the centrifugal compressors end type high-head stages]. Saint Petersburg, 2023. 294 p. EDN: EIBGKB. (In Russ.).

14. Данилишин А. М., Кожухов Ю. В. Численное моделирование турбулентного течения в высоконапорном осе-радиальном рабочем колесе центробежного компрессора холодильных машин // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022.

Т. 6, № 2. С. 59 – 70. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-59-70. EDN: ZDJATL.

Danilishin A. M., Kozhukhov Yu. V. Chislennoye modelirovaniye turbulentnogo techeniya v vysokonapornom oseradial'nom rabochem kolese tsentrobezhnogo kompressora kholodil'nykh mashin [Numerical simulation of turbulent flow in high-head impeller of centrifugal compressor]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 59 – 70. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-59-70. EDN: ZDJATL. (In Russ.).

15. Яблоков А. М., Садовский Н. И., Кожухов Ю. В. Моделирование течения вязкого газа в модельных малорасходных ступенях центробежного компрессора // Территория Нефтегаз. 2019. № 5. С. 28 – 35. EDN: IOKWP.

Yablokov A. M., Sadovskiy N. I., Kozhukhov Yu. V. Modelirovaniye techeniya вязкого газа в модельных малорасходных ступенях центробежного компрессора [Simulation of viscid gas flow in model low consumption centrifugal compressor stages]. *Territoriya Neftegaz. Oil and Gas Territory*. 2019. No. 5. P. 28 – 35. EDN: IOKWP. (In Russ.).

ШЕШУКОВ Артём Павлович, магистрант гр. 3241303/50501 Высшей школы энергетического машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: artgrom.sheshukov.1999@gmail.com

ЯБЛОКОВ Алексей Михайлович, старший преподаватель Высшей школы энергетического машиностроения СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2695-2962

AuthorID (РИНЦ): 846269

ORCID: 0000-0001-7842-9614

AuthorID (SCOPUS): 57199231312

ResearcherID: M-7787-2018

Адрес для переписки: yablokovaleksey@mail.ru

МАРЕНИНА Любовь Николаевна, кандидат технических наук, старший преподаватель Высшей школы энергетического машиностроения СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5842-1771

ORCID: 0000-0001-9380-9754

AuthorID (SCOPUS): 57188961410

ResearcherID: C-6788-2017

Адрес для переписки: marenina_ln@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 27.11.2025.

SHESHUKOV Artem Pavlovich, Master's Student of the Higher School of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg.

Correspondence address: artgrom.sheshukov.1999@gmail.com

YABLOKOV Aleksey Mikhaylovich, Senior Lecturer of the Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 2695-2962
AuthorID (RSCI): 846269
ORCID: 0000-0001-7842-9614
AuthorID (SCOPUS): 57199231312
ResearcherID: M-7787-2018
Correspondence address: yablokovaleksey@mail.ru
MARENINA Lyubov Nikolaevna, Candidate of
Technical Sciences, Senior Lecturer of the Higher
School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.
SPIN-code: 5842-1771
ORCID: 0000-0001-9380-9754

AuthorID (SCOPUS): 57188961410
ResearcherID: C-6788-2017
Correspondence address: marenina_ln@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 18.11.2025; accepted for publication 27.11.2025.