

# 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 VISCOS 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. Импортозамещение 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 гидрогазодинамики 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 врачаются 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 сплиттерных лопаток. Забор воздуха в ступень осуществляется при помощи входной части с радиальным входом. После прохождения через ступень компрессора давление газа достигает 2,5 кг/см<sup>2</sup>. На рис. 1 приведена схема проточной части компрессора в меридиональном сечении.

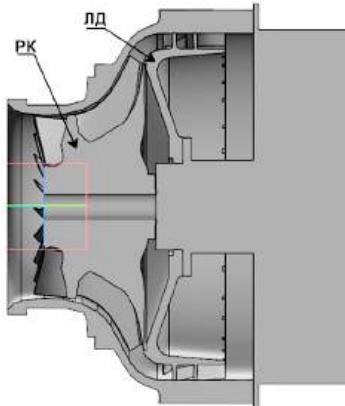
Для построения цифровой модели проточной части исследуемого центробежного компрессора применялось трехмерное сканирование.

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 замеряют 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 Компас-3D**  
**Fig. 1. Assembly of a centrifugal compressor stage in the Kompas-3D program**



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

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 размещение 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, нутrometer 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.



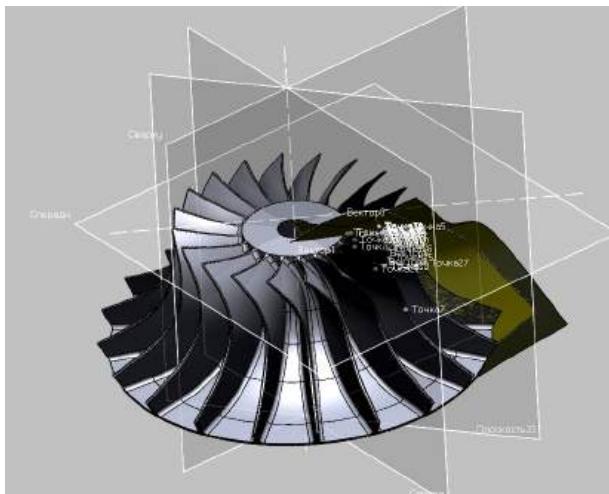
**Рис. 3. Этап сканирования лопаточного диффузора**  
**Fig. 3. Scanning stage of the blade diffuser**

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 неровныестыки из-за погрешности производства деталей. В целях исследования численного моделирования было решено сгладить неровности для более плавной геометрии.

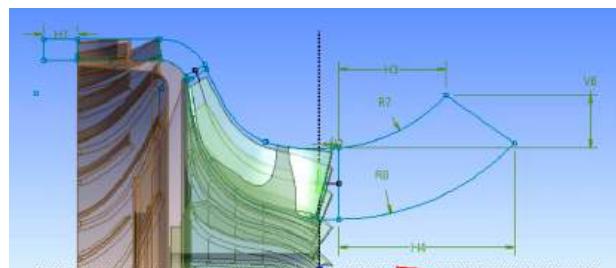
В результате работы были получены необработанные полигональные модели всех элементов компрессора для получения твердотельных моделей в ПО Geomagic Design X.

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.

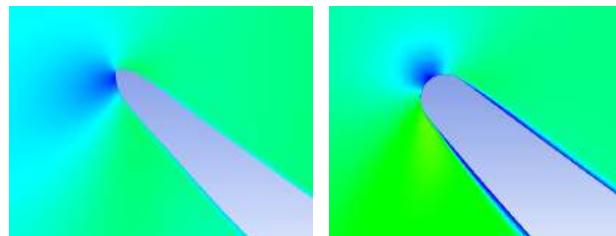
После получения геометрии элементов компрессора следует этап математического моделирования численного эксперимента в ПО с использованием метода контрольных объемов.

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: а — 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 стяжения 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  $u^+$  условились уменьшить это значение в 10 раз. Параметр  $u^+$  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:

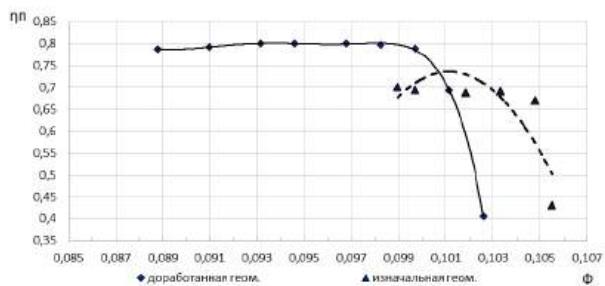
$$\Phi = \frac{4\bar{V}_0}{\pi D_2^2 U_2},$$

где  $\bar{V}_0$  — объемный расход в сечении,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $D_2$  — диаметр рабочего колеса, м;  $U_2$  — окружная скорость на диаметре  $D_2$ ,  $\text{м}/\text{с}$ .

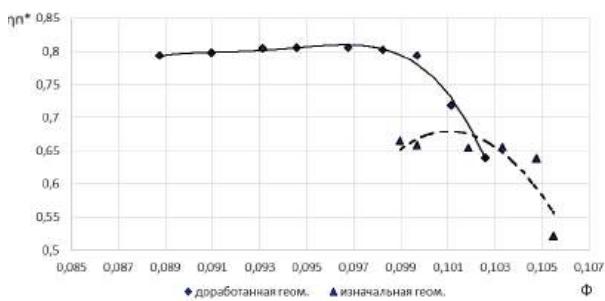
2) коэффициент политропного напора по статическим параметрам:

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

Причем  $h_n$  — политропный напор,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .



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: a — for total parameters; b — 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,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

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

$i^*$  — полные энталпии 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,

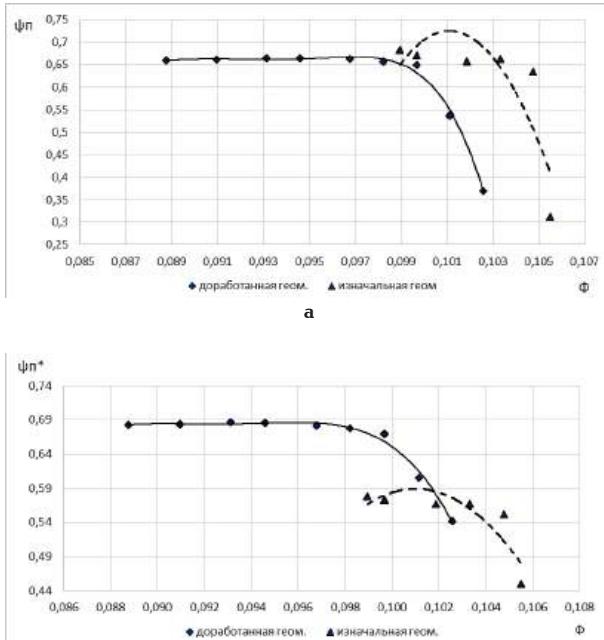


Рис. 8. Графики зависимостей коэффициента политропного напора от условного коэффициента расхода:  
а — по полным параметрам;  
б — по статическим параметрам

Fig. 8. Graphs of the dependence of the polytropic pressure coefficient on the conditional flow coefficient:  
a — 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

- Сон П. Ю. Перспективы и вызовы импортозамещения в российской энергетике // Экономические исследования и разработки. 2023. № 4-2. С. 93–100. EDN: OVXPPD.

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.).

2. 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.).

3. 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.).

4. 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: BUMOY.

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 Aviationsno-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: BUMOY. (In Russ.).

5. 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 zapuskha TS-21 [Development of a mobile stand for launching TS-21]. Molodezhnyy Vestnik Ufimskogo Gosudarstvennogo Aviationsionnogo Tekhnicheskogo Universiteta. 2022. No. 1 (26). P. 47–52. EDN: ZOISYW. (In Russ.).

6. 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.

Keyfets M. L., Gretskiy N. L., Khilko D. N. Revers-inzhiniring v additivnom i remontnom proizvodstve slozhnoprofil'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.).

7. 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 kompressorora [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 материалаообработки. 2021. № 20. С. 238–245. EDN: MRAOWG.

Skrinpichuk 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. Саса Д. А., Тараховский А. Ю. 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 protsessa 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 Perspektivi.* 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 многошаттного 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 tsentrobazhnogo 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 Aviatsionno-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 турбокомпрессорных машин с центробежными компрессорными ступенями концевого типа: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2023. 294 с. EDN: EIBGKB.

Danylyshyn A. M. Povysheniye effektivnosti turbokholodil'nykh mashin s tsentrobazhnymi kompressornymi stupenyami kontsevogo 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 осево-радиальном рабочем колесе центробежного компрессора холодильных машин // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022.

T. 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 tsentrobazhnogo kompressora kholodil'nykh mashin [Numerical simulation of turbulent flow in high-head impeller of centrifugal compressor]. Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsionno-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: IIOKWP.

Yablokov A. M., Sadovskiy N. I., Kozhukhov Yu. V. Modelirovaniye techeniya vyazkogo gaza v model'nykh maloraskhodnykh stupenyakh tsentrobazhnogo kompressora [Simulation of viscous gas flow in model low consumption centrifugal compressor stages]. Territoriya Neftegaz. *Oil and Gas Territory.* 2019. No. 5. P. 28–35. EDN: IIOKWP. (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.