

УДК 621.444

Комплексный подход к созданию геометрической модели камеры сгорания турбореактивного двигателя методом обратного проектирования

Ю.В. Матвеев, А.М. Балакин, М.К. Канакин,
М.А. Лаптев, В.В. Барсков, И.Р. Нурков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

An integrated approach to creating a geometric model of a turbojet engine combustion chamber via reverse engineering

Yu.V. Matveev, A.M. Balakin, M.K. Kanakin,
M.A. Laptev, V.V. Barskov, I.R. Nurkov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Предложен комплексный метод обратного проектирования, примененный для создания высокоточной цифровой геометрической модели камеры сгорания турбореактивного двигателя ВК-1. Работа мотивирована практическими и научно-исследовательскими задачами, включая сохранение инженерного наследия и создание точных цифровых моделей исторически значимых образцов авиационной техники для образовательных целей, а также необходимостью получения корректной геометрической основы для выполнения современных инженерных расчетов (газодинамических, прочностных) и анализа конструкторских решений с перспективой возможной модернизации. Для решения поставленной задачи проведен подготовительный процесс: разборка и очистка камеры сгорания, анализ исторической конструкторской документации, 3D-сканирование внешних поверхностей жаровой трубы и кожухов с помощью портативного сканера Shining 3D EinScan H, а также обработка облаков точек с построением твердотельных моделей в специализированном программном обеспечении Geomagic Design X. Особое внимание уделено воссозданию скрытых и труднодоступных внутренних полостей. Для точного определения геометрических характеристик лопаток завихрителя, критически важного для процесса горения элемента, разработана и успешно апробирована уникальная методика. Она заключается в изготовлении слепков межлопаточных каналов с использованием двухкомпонентного формовочного силикона с низкой усадкой. Точность методики подтверждена результатами измерений ручным инструментом, расхождение с которыми составило 0,80 % для диаметральных размеров и 0,05 % для линейных. Разработанная методика является одним из основных достоинств предлагаемого комплексного подхода, что позволяет преодолеть ограничения стандартного 3D-сканирования без применения такого дорогостоящего оборудования, как компьютерный томограф. Валидация итоговой 3D-модели путем сравнения с исходными данными сканирования и ручными измерениями подтвердила высокую точность результатов: отклонения по корпусу составили менее 1 мм. Полученная цифровая модель предназначена для проведения дальнейших исследований, включая газодинамические и прочностные расчеты с ва-

лидацией на натурном эксперименте. Предложенный комплексный подход, сочетающий анализ документации, относительно недорогое 3D-сканирование и оригинальный метод силиконовых слепков, можно тиражировать для обратного проектирования других сложных узлов авиационных и промышленных газотурбинных двигателей, особенно в условиях ограниченного доступа к оборудованию или отсутствия полной конструкторской документации.

EDN: JGYIHW, <https://elibrary/jgyihw>

Ключевые слова: обратное проектирование, 3D-сканирование, камера сгорания, турбореактивный двигатель, САПР

The article presents a comprehensive reverse engineering method applied to create a high-precision digital geometric model of the combustion chamber (CC) of the VK-1 turbojet engine. The work is motivated by practical and scientific research tasks, including preserving engineering heritage, creating accurate digital models of historically significant aircraft for educational purposes, as well as the need to obtain a correct geometric basis for performing modern engineering calculations (gas-dynamic, structural strength) and analyzing design solutions with the prospect of possible modernization. To solve the task, a preparatory process was carried out: disassembly and cleaning of the CC, analysis of historical design documentation, 3D scanning of the external surfaces of the combustion liner and casings using a Shining 3D EinScan H portable scanner, and subsequent point cloud processing followed by solid model reconstruction in specialized Geomagic Design X software. Special attention is paid to the key problem—recreating the hidden and hard-to-access internal cavities. To accurately determine the geometry of the swirler vanes, a critically important element for the combustion process, a unique technique was developed and successfully tested. This technique involves creating casts of the inter-vane channels using a two-component molding silicone with low shrinkage. Its accuracy is confirmed by verification, which showed a deviation of only 0.80% for diametral and 0.05% for linear dimensions. This method, which involves making casts of the inter-vane channels using a two-component molding silicone with low shrinkage, is one of the key advantages of the proposed comprehensive approach, allowing the limitations of standard 3D scanning to be overcome without the use of expensive equipment such as computed tomography scanners. Validation of the final 3D model by comparing it with the original scan data and manual measurements confirmed the high accuracy of the results: deviations on the casing were less than 1 mm. The obtained digital model is intended for further research, including gas-dynamic and structural strength calculations, with subsequent validation in full-scale experiments. The demonstrated comprehensive approach, combining documentation analysis, relatively inexpensive 3D scanning, and the original silicone casting method, can be successfully replicated for the reverse engineering of other complex components of aviation and industrial gas turbine engines, especially in conditions of limited access to equipment or lack of complete design documentation.

EDN: JGYIHW, <https://elibrary/jgyihw>

Keywords: reverse engineering, 3D scanning, combustion chamber, turbojet engine, CAD

Сохранение инженерного наследия и цифровая документация исторически значимых образцов авиационной техники, а также задачи учебно-исследовательского процесса требуют создания точных цифровых моделей сложных узлов. Такие модели необходимы для проведения современных инженерных расчетов (газодинамических, прочностных), анализа конструкторских решений, образовательной деятельности и потенциальной модернизации устаревших, но еще эксплуатируемых агрегатов [1, 2].

Для реализации этой цели необходимо решить такие сложные инженерные задачи, как выполнение опытно-конструкторских и опытно-технических работ, создание электронных моделей и цифровых двойников, разработка опытных образцов промышленных изделий и их компонентов и обеспечение авторского надзора на этапах проектирования и производства [3].

В высокотехнологичных отраслях, таких как аэрокосмическая, энергетика и точное машино-

строение, концепции цифрового двойника и обратного проектирования (ОП) или реверс-инжиниринг (Reverse Engineering) позволяют получить цифровую модель исследуемого объекта. Они занимают центральное место в процессах проектирования, производства, эксплуатации и технического обслуживания сложных изделий.

ОП — это комплекс технологий, аппаратных и программных средств, необходимых для создания свойств объекта с внесением в него доработок, если проектировщик не предоставил полную информацию о структуре и технологии создания [4]. С развитием современных технологий ОП, активно используемое в инженерной среде, получило значительное развитие.

Методы ОП направлены на воссоздание цифровой модели физического объекта при отсутствии или неполноте исходной конструкторской документации. Такой подход широко

применяют при анализе конструкции, ремонте и восстановлении утраченных деталей, создании цифровых двойников для инженерного анализа, а также в образовательных целях при изучении исторических образцов техники. В контексте авиационного двигателестроения ОП таких сложных и ответственных узлов, как камера сгорания (КС), позволяет сохранить инженерные знания, заложенные в конструкции, и создать основу для их дальнейшего анализа и возможной модернизации с использованием современных вычислительных методов.

В настоящее время существует много методов измерения (МИ), используемых для ОП, каждый из которых имеет определенные достоинства и недостатки. Чтобы выбрать метод, необходимо выполнить сравнительный анализ, основываясь на области их применения. Сравнительная характеристика методов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика различных методов измерения ОП

Метод измерения	Описание метода	Достоинства	Недостатки	Область применения
Координатно-измерительные машины (контактный метод) [5]	Щуп с шарообразным наконечником физически касается поверхности детали. Положение щупа с высочайшей точностью фиксируется в трехмерном пространстве	Самая высокая точность. Нечувствительность к прозрачности, блеску или цвету материала детали	Медленный процесс измерения. Не подходит для измерения сложной геометрической конфигурации и деталей, изготовленных из мягкого материала (высокий риск деформирования детали). Результатом замеров является набор точек, а не поверхности. Сложность в эксплуатации оборудования. Высокая стоимость оборудования [6]	Контроль качества. Проверка критических размеров
Лазерное 3D-сканирование [7]	Лазерный луч проецируется на объект, а камера фиксирует его отклонение. По триангуляции вычисляется расстояние до каждой точки	Очень высокая скорость получения данных. Высокая плотность облака точек. Подходит для более сложных деталей. Позволяет работать с крупногабаритными объектами. Высокая точность	Чувствительность к блеску и прозрачности поверхностей (требуется использование специального матирующего спрея). Зависит от освещения и вибрации. Требуется разборки детали для измерения внутренних геометрических характеристик	Воссоздание сложных криволинейных поверхностей

Окончание таблицы 1

Метод измерения	Описание метода	Достоинства	Недостатки	Область применения
Оптическое 3D-сканирование [7]	На объект проецируют сетку (шаблон) из белого или синего света. Камеры фиксируют искажение этого шаблона на поверхности объекта и вычисляют 3D-координаты	Самая высокая скорость получения данных. Высокая плотность облака точек. Подходит для более сложных деталей. Позволяет работать с крупногабаритными объектами. Высокая точность [8]	Чувствительность к блеску и прозрачности поверхностей (требуется использование специального матирующего спрея). Зависит от освещения и вибрации. Требуется разборки детали для измерения внутренних геометрических характеристик [9]	Воссоздание сложных криволинейных поверхностей
Компьютерная томография	Рентгеновские лучи проходят через объект, создавая серию срезов. Специальное программное обеспечение объединяет эти срезы в точную 3D-модель	Позволяет получать внутренние геометрические характеристики детали, не требует разборки детали. Нечувствительность к прозрачности, блеску или цвету материала детали. Очень высокая точность	Ограничение по размеру детали. Медленный процесс измерения. Ограничение по материалам детали. Высокая стоимость оборудования	Анализ литых, внутренних поверхностей и каналов

Анализ методов ОП выявил их основные ограничения в контексте задачи воссоздания сложных внутренних полостей, характерных для узлов газотурбинных двигателей, таких как КС. Контактные методы неприменимы для внутренних труднодоступных элементов. Оптическое 3D-сканирование, несмотря на высокую скорость и точность для внешних контуров, не позволяет получить данные о скрытых внутренних поверхностях без разрушающего вмешательства. Компьютерная томография является оптимальным решением для подобных задач, однако часто недоступна из-за высокой стоимости оборудования, требований к радиационной безопасности и ограничений по размерам объектов.

Таким образом, для воссоздания полной геометрической конфигурации объекта, подобного КС, в условиях ограниченных ресурсов существует методический пробел, требующий разработки гибридных неразрушающих подходов, комбинирующих доступные технологии.

Цель работы — воссоздание высокоточной цифровой геометрической модели КС ТРД ВК-1 путем разработки и применения комплексного

метода ОП, сочетающего оптическое 3D-сканирование, анализ конструкторской документации и оригинальную методику силиконового формования труднодоступных внутренних полостей.

Рассмотрим МИ с использованием 3D-сканирования путем проецирования сетки на деталь. Этот метод выбран исходя из сложной конфигурации рассматриваемой детали и низкой стоимости воссоздания.

3D-сканирование в процессе ОП включает в себя три основных этапа (рис. 1): сканирование, обработку точек и разработку геометрической твердотельной модели. Эти этапы иллюстрируют различные фазы, объект из физического состояния преобразуется в облако точек, а затем в твердотельную модель.

Этап сканирования состоит из выбора методов сканирования, подготовки детали и сканирования. По окончании этого этапа получают облако точек. Этап обработки точек включает в себя импорт необработанных данных облака точек, снижение шума и сокращение количества точек с помощью алгоритмов фильтрации. Данные облака точек можно объединить, если

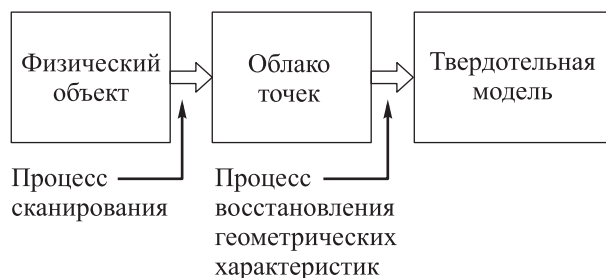


Рис. 1. Этапы обратного инжиниринга

вся часть захвачена несколькими сканированиями. Этап разработки геометрической модели является самой сложной операцией ОП. Для работы с облаком точек требуется специальное программное обеспечение, позволяющее проводить точный замер и обработку. В нашей работе использована программа Geomagic Design X, которая объединяет инструменты для работы с данными 3D-сканирования и возможности системы автоматизированного проектирования (САПР).

Работа [10] посвящена изучению потенциала 3D-сканирования в индустрии 4.0. Отмечено, что инженерия — важная область, в которой 3D-сканирование раскрывает значительный потенциал. Возможность сканирования любых объектов и использования САПР для их модификации упрощает процедуры ОП и быстрого прототипирования. Отличительным признаком Индустрии 4.0 является возможность проведения различных исследований, затрачивая

меньшие ресурсы и время. Аналогично быстрое прототипирование и методы ОП необходимы для создания большинства продуктов.

Авторами работы [11] проведено ОП рабочего центробежного насоса с использованием 3D-сканирования, с помощью которого получено облако точек поверхностей рабочего колеса для извлечения геометрических размеров при создании твердотельной модели.

В публикации [12] показаны поэтапная методика использования 3D-сканирования, характеристики сканеров и контроль качества на примере тестовой детали. Обобщены возможности и проблемы 3D-сканирования для ОП и контроля качества на основе литературного обзора и кейса с компонентом сложной геометрической конфигурации.

В статье [13] проанализирован потенциал использования ОП путем 3D-сканирования в оперативном ремонте с воссозданием геометрических характеристик поврежденной детали.

Рассмотрим процесс обратного проектирования КС турбореактивного двигателя (ТРД) на примере ВК-1.

Будучи одним из первых серийных отечественных ТРД, ВК-1 представляет значительный интерес для изучения эволюции конструкторских решений в авиастроении и служит ценным объектом для образовательных и исследовательских целей. КС — критически важный и технологически сложный узел ТРД, что



Рис. 2. Блок-схема алгоритма процесса ОП камеры сгорания ТРД ВК-1



а
б
Рис. 3. Внешний вид кожуха (а)
и жаровой трубы (б) КС

требует проведения комплексного подхода к воссозданию цифровой модели. Особенности выбранного способа проецирования сетки на деталь заключаются в ограничении возможности сканирования внутренних полостей и необходимости значительной подготовки детали к процессу сканирования с целью исключения погрешности от бликов отражающих поверхностей.

Перед началом моделирования КС проведены подготовительные работы — подготовка детали, отработка методики моделирования внутренних полостей и сам процесс сканирования. Так как в открытом доступе отсутствует информация по воссозданию сложной геометрической конфигурации с большим количеством внутренних полостей [14], разработан алгоритм процесса (рис. 2).

Предлагаемый комплексный подход заключается в комбинировании нескольких взаимодополняющих МИ для преодоления ограничений любого отдельно взятого метода. Он включает в себя анализ исторической конструкторской документации для восполнения утраченных данных, 3D-сканирование доступных внешних поверхностей, разработку и применение оригинального метода силиконовых слепков для недоступных сканеру внутренних полостей и интеграцию всех полученных данных в единую твердотельную модель.

В состав КС входят критически важные элементы, обеспечивающие горение и нормальное течение рабочего тела во внутренних полостях. По этой причине первый этап включал в себя разборку КС на составные части: жаровую трубу, верхнюю и нижнюю части внешнего кожуха для поочередного сканирования составных ча-

стей, образующих внешний контур течения рабочего тела. Внешний вид кожуха и жаровой трубы КС показан на рис. 3.

Одним из недостатков 3D-сканирования является высокая чувствительность к бликам и отражениям от материала детали, вследствие чего деталь требует серьезной подготовки перед началом процесса, как это сделано в работе [15] при ОП рабочего колеса центробежного насоса К20/30. В связи с этим возникла необходимость очистки жаровой трубы от нагара, появившегося при эксплуатации, и механической очистки внутренних полостей. Чтобы снизить влияние бликов с целью получения максимальной точности сканирования, сканируемые объекты покрывали матирующим спреем.

Внутренняя часть жаровой трубы состоит из завихрителя, ее конуса, перегородки и сферического кольца, сканирование которых не представлялось возможным без вырезания сектора. Такая сложность возникла и у Иржи Соучека, который в своей работе описал процесс ОП насоса, воспроизведя внешний контур с помощью сканирования, а части впускного трубопровода и коленчатая часть трубы после отсасывающей трубы были только лишь частично просканированы снаружи из-за труднодоступности, и впоследствии геометрические характеристики частично были взяты из чертежей трубопроводной системы [16].

Проведенный в ходе подготовки к началу трехмерного сканирования анализ конструкторской документации в альбоме чертежей, схем и общих видов ТРД [17], позволил воссоздать геометрические характеристики входного конуса и полусферического колпака по чертежам (рис. 4).

Однако в этом альбоме отсутствовали геометрические характеристики завихрителя, выполняющего важную роль в обеспечении процесса горения. Среди различных МИ проведения ОП для получения геометрических характеристик внутренних полостей наилучшим вариантом являются компьютерные томографы. Но, исходя из высокой стоимости и отсутствия доступа к ним, принято решение о разработке специальной методики для проведения ОП этой детали.

Основная идея разработанной методики заключается в заливке внутренних полостей формовочным силиконом с целью получения конфигурации межлопаточного канала за-

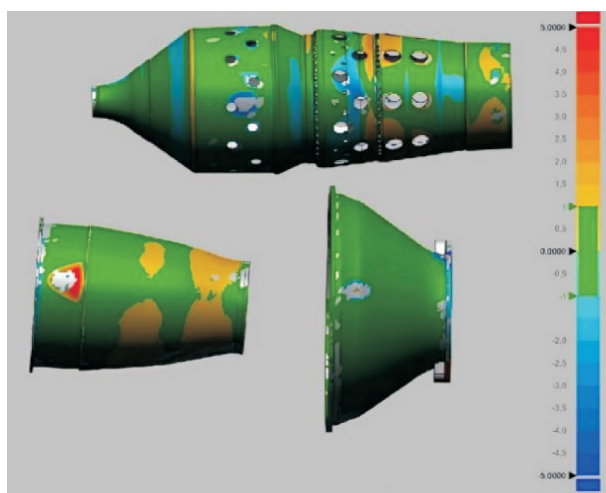


Рис. 6. Результаты сравнения твердотельной модели и облака точек с отклонениями

дальнейшего сканирования и создания 3D-модели.

Для выполнения 3D-сканирования использован портативный 3D-сканер Shining 3D EinScan H [18], техническая характеристика которого приведена ниже.

Техническая характеристика сканера Shining 3D EinScan H

Технология сканирования . . . Оптическая гибридная

Точность сканирования, мм 0,05...0,60

Зона сканирования, мм:

минимальная 420×440

максимальная 780×900

Скорость сканирования/измерений,

точек в секунду 1 200 000

Рабочее расстояние до объекта, мм 470

Перед началом сканирования выполнена калибровка сканера с помощью специальной калибровочной мишени, входящей в комплект поставки. Для обеспечения точности фокусировки и корректности работы системы процесс калибровки проведен в среде ExScan Pro. Вы-

бран режим лазерного сканирования, а разрешение сканирования установлено максимальным (0,05 мм).

После сканирования одного вырезанного сектора межлопаточного канала завихрителя построена его 3D-модель. С помощью операции массива по концентрической сетке получена жидкотельная модель канала завихрителя, а из нее — лопаточный аппарат завихрителя путем булевой операции.

На следующем этапе ОП выполняли сканирование и получали облако точек жаровой трубы и внешнего кожуха. Перед началом сканирования на детали наносили специальный материал для снижения брака от бликов, а на поверхностях деталей размещали метки, по которым сканер определял пространственные маркеры для создания облака точек. Особую сложность вызвали деформированные части кожухов, которыми надо было пренебречь, так как они представляли собой вмятины на корпусе, полученные вследствие их некачественной консервации и хранения. Фрагменты процесса сканирования показаны на рис. 5.

По облаку точек сняты необходимые геометрические размеры и проведено сравнение созданной твердотельной модели и исследуемого объекта [19]. По результатам сравнения геометрических характеристик жаровой трубы, верхнего и нижнего кожуха отклонения составили менее 1 мм по корпусу, за исключением зон концентраторов, связанных с корпусными дефектами выбранных деталей и сложностью точного сопоставления моделей и облака точек. Результаты сравнения твердотельной модели и облака точек с отклонениями приведены на рис. 6. Для подтверждения точности сканирования выполнена проверка размеров с помощью ручного инструмента. Результаты измерения размеров ручным инструментом и сканером приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения размеров ручным инструментом и сканером

Параметр	Значение, мм	Отклонение, %
Внутренний диаметр на входе в жаровую трубу	26,10/26,12	0,12
Внутренний диаметр первого ряда перфораций для охлаждающего воздуха	16,20/16,25	0,30
Внутренний диаметр второго ряда перфораций для охлаждающего воздуха	8/8	0
Внутренний диаметр верхнего внешнего кожуха	140,0/140,7	0,5
Длина жаровой трубы	613/608	0,8
Примечание. В числителе дроби указаны значения, измеренные ручным инструментом, в знаменателе — сканером.		

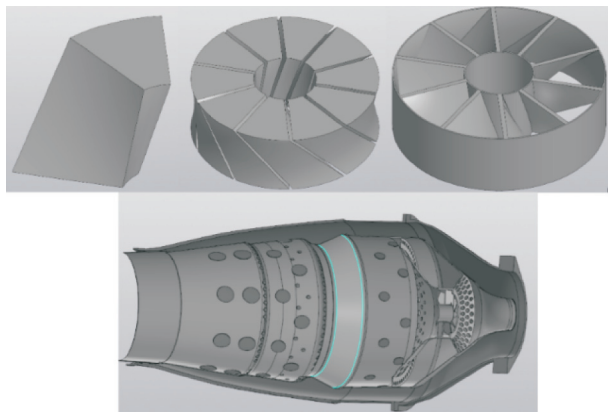


Рис. 7. Твёрдотельные модели КС в сборе и компонентов КС

На основе данных, полученных в ходе ОП, построены твёрдотельные модели КС в сборе и компонентов КС (рис. 7).

Выводы

1. Предложен комплексный подход, сочетающий анализ документации, недорогое 3D-сканирование внешних контуров и метод силиконовых слепков, позволяющий с высокой

точностью воссоздать полную цифровую модель КС.

2. Конфигурации внешнего кожуха и жаровой трубы КС ТРД ВК-1 воссозданы с помощью метода 3D-сканирования, выбранного на основании дешевизны, высокой точности и плотности облака точек. Для устранения недостатков этого МИ проведена очистка полостей от нагара, появившегося при эксплуатации, и нанесен матирующий спрей с целью исключения влияния бликов.

3. Для точного определения геометрических характеристик лопаток завихрителя КС разработана методика, заключающаяся в изготовлении слепков межлопаточных каналов с использованием двухкомпонентного формовочного силикона с низкой усадкой. Точность методики подтверждена результатами измерений ручным инструментом, расхождение с которыми составило 0,80 % для диаметральных размеров и 0,05 % для линейных.

4. Полученная цифровая модель предназначена для проведения дальнейших исследований, включая газодинамические, прочностные расчеты и валидацию на натурном эксперименте.

Литература

- [1] Arts E., Bäßler S., Haufe A. et al. Digital twin for research aircraft. *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt — Lilienthal-Oberth*, 2023, doi: <https://doi.org/10.25967/570160>
- [2] Чертовских С.В. Внедрение новых информационных технологий в образовательный процесс. *Актуальные вопросы высшего образования — 2022. Мат. науч.-мет. конф.* Уфа, Изд-во УГНТУ, 2022, с. 49–53.
- [3] Федеральный закон № 144-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 22 июня 2024 г.
- [4] Водин Д.В. Применение технологии обратного инжиниринга в машиностроении. *Технические науки: проблемы и перспективы. Мат. IV межд. науч. конф.* Санкт-Петербург, Свое издательство, 2016, с. 67–69.
- [5] Кудряшов И.А., Беякова В.А. Координатно-измерительные машины: сравнительный анализ характеристик, рекомендации по применению. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2022, № 4, с. 302–307.
- [6] Raja V., Fernandes J.K. Introduction to reverse engineering. In: *Reverse engineering*. Springer, 2007, pp. 1–9, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_1
- [7] Varda K., Softić A., Zaimović-Uzunović N. et al. Dimensional and positional control of industrial workpiece using CMM and optical 3D scanner. In: *New technologies, development and application VI*. Springer, 2023, pp. 269–275, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-31066-9_28
- [8] Montáns F.J., Cueto E., Bathe K.J. Machine learning in computer aided engineering. In: *Machine learning in modeling and simulation*. Springer, 2023, pp. 149–178, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36644-4_1
- [9] Geng Z., Bidanda B. Review of reverse engineering systems — current state of the art. *Virtual Phys. Prototyp.*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 161–172, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1302787>

- [10] Haleem A., Javaid M., Singh R.P. et al. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: an overview. *Int. J. Cogn. Comput. Eng.*, 2022, vol. 3, pp. 161–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijcse.2022.08.003>
- [11] Ермакова М.А., Тоньшина А.В. Методика реверс-инжиниринга рабочего колеса центробежного насоса. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Мат. VI межд. науч. конф.* Т. 1. Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020, с. 234–236.
- [12] Robin H.H., Hirpa G.L. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Mater. Today: Proc.*, 2021, vol. 45-6, pp. 5255–5262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>
- [13] Dúbravčík M., Kender S. Application of reverse engineering techniques in mechanics system services. *Procedia Eng.*, 2012, vol. 48, pp. 96–104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.491>
- [14] Daneshmand M. et al. 3D scanning: a comprehensive survey. *arXiv:1801.08863*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.08863>
- [15] Погосян А.Ж., Трегубов П.П., Демченко М.В. и др. Реверсивный инжиниринг рабочего колеса центробежного насоса К20/30. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2025, № 5, с. 200–208.
- [16] Souček J., Bílková E., Nowak P. Reverse engineering of pump as turbine for CFD analysis. *Acta Polytech.*, 2024, vol. 64, no. 1, pp. 52–58, doi: <https://doi.org/10.14311/AP.2024.64.0052>
- [17] Адрианов Я.С., Тулаев Н.Г., Кириченко В.И. и др. *ВК-1 турбореактивный двигатель альбом чертежей, схем и общих видов двигателя*. Ленинград, ЛКВВИА, 1950. 56 с.
- [18] *Hybrid LED & infrared light source handheld color 3D scanner quick start guide*. URL: <https://encdn.shining3d.com/2020/09/EinScan-H-Guide.pdf> (дата обращения: 03.09.2025).
- [19] Menna F., Troisi S. Low cost reverse engineering techniques for 3D modelling of propellers. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, vol. 38–5, pp. 452–457.

References

- [1] Arts E., Bäßler S., Haufe A. et al. Digital twin for research aircraft. *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth*, 2023, doi: <https://doi.org/10.25967/570160>
- [2] Chertovskikh S.V. Introduction of new information technologies in the educational process. *Aktualnye voprosy vysshego obrazovaniya — 2022. Mat. nauch.-met. konf.* [Actual Problems of Higher Education — 2022. Proc. Sci.-Methodological Conf.] Ufa, Izd-vo UGNTU, 2022, pp. 49–53. (In Russ.).
- [3] Federalnyy zakon no. 144-FZ «O vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii» ot 22 iyunya 2024 g. (In Russ.). [Federal Law No. 144-FZ "On amendments to certain legislative acts of the Russian federation" of 22.06.2024]
- [4] Vodin D.V. [Application of Reverse Engineering Technology in Mechanical Engineering]. *Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy. Mat. IV mezhd. nauch. konf.* [Engineering Sciences: Problems and Prospects. Proc. IV Int. Sci. Conf.]. Sankt-Peterburg, Svoe izdatelstvo, 2016, pp. 67–69. (In Russ.).
- [5] Kudryashov I.A., Belyakova V.A. Coordinate-measuring machines: comparative analysis of characteristics, recommendations for application. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2022, no. 4, pp. 302–307. (In Russ.).
- [6] Raja V., Fernandes J.K. Introduction to reverse engineering. In: *Reverse engineering*. Springer, 2007, pp. 1–9, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2_1
- [7] Varda K., Softić A., Zaimović-Uzunović N. et al. Dimensional and positional control of industrial workpiece using CMM and optical 3D scanner. In: *New technologies, development and application VI*. Springer, 2023, pp. 269–275, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-31066-9_28
- [8] Montáns F.J., Cueto E., Bathe K.J. Machine learning in computer aided engineering. In: *Machine learning in modeling and simulation*. Springer, 2023, pp. 149–178, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36644-4_1

- [9] Geng Z., Bidanda B. Review of reverse engineering systems — current state of the art. *Virtual Phys. Prototyp.*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 161–172, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1302787>
- [10] Haleem A., Javaid M., Singh R.P. et al. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: an overview. *Int. J. Cogn. Comput. Eng.*, 2022, vol. 3, pp. 161–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>
- [11] Ermakova M.A., Tonshina A.V. [Methodology of reverse-engineering for centrifugal pump impeller]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. Mat. VI mezhd. nauch. konf. T. 1* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. Proc. VI Int. Sci. Conf. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva Publ., 2020, pp. 234–236. (In Russ.).
- [12] Robin H.H., Hirpa G.L. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Mater. Today: Proc.*, 2021, vol. 45-6, pp. 5255–5262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>
- [13] Dúbravčík M., Kender S. Application of reverse engineering techniques in mechanics system services. *Procedia Eng.*, 2012, vol. 48, pp. 96–104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.491>
- [14] Daneshmand M. et al. 3D scanning: a comprehensive survey. *arXiv:1801.08863*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.08863>
- [15] Pogosyan A.Zh., Tregubov P.P., Demchenko M.V. et al. Reversible engineering of the impeller of the centrifugal pump K20/30. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2025, no. 5, pp. 200–208. (In Russ.).
- [16] Souček J., Bílková E., Nowak P. Reverse engineering of pump as turbine for CFD analysis. *Acta Polytech.*, 2024, vol. 64, no. 1, pp. 52–58, doi: <https://doi.org/10.14311/AP.2024.64.0052>
- [17] Adrianov Ya.S., Tulaev N.G., Kirichenko V.I. et al. *VK-1 turboreaktivnyy dvigatel albom chertezhey, skhem i obshchikh vidov dvigatelya* [VK-1 turbojet engine album of drawings, diagrams and general views of the engine]. Leningrad, LKVVIA Publ.s, 1950. 56 p. (In Russ.).
- [18] Hybrid LED & infrared light source handheld color 3D scanner quick start guide. URL: <https://encdn.shining3d.com/2020/09/EinScan-H-Guide.pdf> (accessed: 03.09.2025).
- [19] Menna F., Troisi S. Low cost reverse engineering techniques for 3D modelling of propellers. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, vol. 38–5, pp. 452–457.

Статья поступила в редакцию 12.12.2025

Информация об авторах

МАТВЕЕВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: matveev_yuv@spbstu.ru).

БАЛАКИН Антон Михайлович — инженер Высшей школы энергетического машиностроения. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: balakin_am@spbstu.ru).

КАНАКИН Михаил Константинович — инженер Высшей школы энергетического машиностроения. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: kanakin_mk@spbstu.ru).

Information about the authors

MATVEEV Yuri Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Higher School of Power Engineering. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Polytechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: matveev_yuv@spbstu.ru).

BALAKIN Anton Mikhailovich — Engineer, Higher School of Power Engineering. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Polytechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: balakin_am@spbstu.ru).

KANAKIN Mikhail Konstantinovich — Engineer, Higher School of Power Engineering. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Polytechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: kanakin_mk@spbstu.ru).

ЛАПТЕВ Михаил Александрович — ассистент Высшей школы энергетического машиностроения. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: laptev_ma@spbstu.ru).

LAPTEV Mikhail Aleksandrovich — Assistant, Higher School of Power Engineering. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Polytechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: laptev_ma@spbstu.ru).

БАРСКОВ Виктор Валентинович — доктор технических наук, директор Института Энергетики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: barskov_vv@spbstu.ru).

BARSKOV Viktor Valentinovich — Doctor of Science (Eng.), Director of the Institute of Power Engineering. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Polytechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: barskov_vv@spbstu.ru).

НУРКОВ Иван Романович — инженер Высшей школы энергетического машиностроения. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: nurkov_ir@spbstu.ru).

NURKOV Ivan Romanovich — Engineer, Higher School of Power Engineering. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Polytechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: nurkov_ir@spbstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Матвеев Ю.В., Балакин А.М., Канакин М.К., Лаптев М.А., Барсков В.В., Нурков И.Р. Комплексный подход к созданию геометрической модели камеры сгорания турбореактивного двигателя методом обратного проектирования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 10, с. 101–112.

Please cite this article in English as:

Matveev Yu.V., Balakin A.M., Kanakin M.K., Laptev M.A., Barskov V.V., Nurkov I.R. An integrated approach to creating a geometric model of a turbojet engine combustion chamber via reverse engineering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 10, pp. 101–112.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Высокочастотные гравитационные волны»

**Авторы: И.В. Фомин, А.Н. Морозов, И.С. Голяк,
С.В. Червон, А.Л. Назолин**

Представлен обзор возможных космологических и астрофизических источников высокочастотных гравитационных волн. Проанализированы связанные состояния гравитационного и электромагнитного полей в рамках задачи генерирования и детектирования гравитационных волн. Рассмотрены перспективные методы детектирования высокочастотных гравитационных волн.

Для физиков, интересующихся проблемами теории гравитации, космологии, занимающихся гравитационно-волновыми исследованиями, а также для студентов старших курсов, магистров и аспирантов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>