

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРЕПОДАВАНИЯ

УДК 378.147:372.8:621:004.92

DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-3-35-44

Е.В. Верхотурова

Канд. хим. наук, доцент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

С.А. Пронин

Ст. преподаватель,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Г.А. Иващенко

Д-р пед. наук, профессор,
Братский государственный университет,
Россия, 665709, Иркутская область, г. Братск,
ул. Макаренко, 40

Реверсивный инжиниринг — эффективный инструмент обучения инженерной графике

Аннотация. Важным принципом подготовки высококвалифицированных инженерных кадров в современном мире является целесообразное гармоничное сочетание традиционных методов обучения и современных информационных технологий с целью повышения эффективности образовательного процесса. Это обуславливает необходимость трансформирования основного содержания дисциплин в технических вузах, в том числе графического цикла. Геометро-графические дисциплины формируют графическую грамотность обучающихся, которая является частью профессиональной культуры будущего инженера. Поскольку сегодня наблюдается снижение уровня и качества графической компетентности, поиск лучших инструментов решения этой проблемы является актуальным. В данном исследовании предлагается внедрение технологии реверсивного инжиниринга в графический практикум по дисциплине «Инженерная графика». Цель исследования — научно-методическое обоснование необходимости применения реверсивного инжиниринга в методике обучения инженерной графике. В статье рассмотрено понятие «реверсивный инжиниринг», его применение для решения инженерных задач и в образовательном процессе. Показано, что реверсивный инжиниринг детали и эскиз детали применяют при решении вопросов организации производства, в опытно-производстве, ремонте и других случаях, для решения схожих, а иногда и одинаковых инженерных задач. Сделано предположение, что технология реверсивного инжиниринга в условиях производства может заменить функцию эскизирования детали. В образовательном процессе для некоторых направлений подготовки предлагается рассмотреть реверсивный инжиниринг детали в дополнение темы «Эскиз детали». Приведено сравнение двух технологий создания трехмерной

цифровой модели детали по готовому изделию: реверсивный инжиниринг и эскизирование детали. В рамках учебного процесса предлагается рассматривать ее как ситуационную или комплексную задачу. Научно-методическое обоснование необходимости применения реверсивного инжиниринга в методике обучения инженерной графике основывается на результатах проведенного эксперимента, включавшего параллельные операции реверсивного инжиниринга и эскизирования детали.

Ключевые слова: реверсивный инжиниринг, 3d-сканер, 3d-сканирование, проектирование, инженерные задачи, эскизирование детали, 3d-модель.

E.V. Verkhoturova

Ph.D., Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russia

S.A. Pronin

Senior Lecturer,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russia

G.A. Ivashchenko

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Bratsk State University,
40, Makarenko st., Irkutsk region, Bratsk, 665709, Russia

Reverse Engineering Is an Effective Tool for Teaching Engineering Graphics

Abstract. This study proposes the introduction of reverse engineering technology into a graphic workshop in the discipline «Engineering Graphics». The purpose of this study was the scientific and methodological substantiation of the need to use reverse engineering in the methodology of teaching engineering graphics. The article considers the concept of «reverse engineering», its application for solving engineering problems and in the educational process. It is shown that reverse engineering of a part and a sketch of a part are used in solving issues of production organization, in pilot production, repair and other cases, to solve similar and sometimes identical engineering problems. It has been suggested that the technology of reverse engineering in production conditions can replace the function of sketching a part. In the educational process for some areas of training, it is proposed to consider reverse engineering of the part in addition to the topic “part sketch”. A comparison is made of the use of reverse engineering technology and part sketching to solve the engineering problem of obtaining a three-dimensional digital model of a part. As part of the educational process, it is proposed to consider it as a situational or complex task. The scientific and methodological substantiation of the need to use reverse engineering in the methodology of teaching engineering graphics is based on the results of the experiment, which included parallel operations of reverse engineering and part sketching.

Keywords: reverse engineering, 3d scanner, 3d scanning, design, engineering tasks, part sketching, 3d model.

Для подготовки высококвалифицированных инженерных кадров, отвечающих требованиям индустрии 4.0, необходимо создать условия образовательной среды, которые будут соответствовать критериям динамично развивающегося проектирования как основного вида инженерной деятельности [21] и способствующие повышению эффективности образовательного процесса в рамках инженерно-технических дисциплин, при изучении которых обучающиеся приобретают профессиональные компетенции.

Неотъемлемой составляющей профессиональной культуры будущих специалистов является графическая грамотность, формируемая в результате освоения геометро-графических дисциплин. Профессиональные стандарты Минтруда РФ и иные регламентирующие документы указывают на то, что компетентность в области начерченной геометрии и компьютерной графики необходима практически всем специалистам инженерно-технического профиля. В каждом инженерном решении, технической инновации и изобретении определяющей является геометрическая составляющая [19], а также в связи с тем, что геометрия имеет абсолютное распространение во всех типах объектов и процессов, играет решающую роль на каждом этапе проектирования любого технического объекта — всё это предопределяет геометрию как основу проектирования [12].

Достаточно быстрое обновление требований к подготовке будущих специалистов в связи с внедрением информационных технологий во все сферы профессиональной деятельности актуализирует поиск целесообразных методик, направленных на изменение профессиональной компетентности [15; 23], что непосредственно указывает на необходимость трансформирования основного содержания графических дисциплин в технических вузах [11; 23].

Известно, что интеграция традиционных методов обучения в графической подготовке обучающихся с современными информационными технологиями улучшает возможности коммуникации и способствует повышению качества обучения [1; 27], повышению наглядности представления изучаемых объектов, значительному улучшению понимания и восприятия [6; 14; 23; 24]. В данном исследовании в качестве инструмента повышения эффективности образовательного процесса по инженерной графике предлагается внедрение технологии реверсивного инжиниринга.

Цель исследования — научно-методическое обоснование необходимости применения реверсивного инжиниринга в методике обучения инженерной графике.

Реверсивный инжиниринг (реинжиниринг, реверс-инжиниринг, обратное проектирование, обрат-

ный инжиниринг) можно охарактеризовать как деятельность, направленную на создание аналога или точной копии исследуемого объекта, путем исследования его конструкции, принципа работы, свойств, физических и геометрических характеристик. В переводе с английского понятие *reverse engineering* представляется как «обратная разработка» или «разобрать механизм с целью понять, как это работает», т.е. процесс проектирования осуществляется в обратном направлении — от физического объекта к его абстрактному представлению, от материального к цифровому.

Технология реверсивного инжиниринга активно развивается сегодня, хотя относится к числу самых «старых» методов проектирования.

Проектирование можно охарактеризовать как «процесс получения и преобразования исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса» поисково-исследовательских, расчетно-графических и проектно-конструкторских работ [26]. Исходным (первичным) описанием объекта является абстрактная модель изделия (идея или техническое задание), а окончательное описание (результат проектирования) — либо рабочий проект, представляющий комплект конструкторской документации, содержащий сведения о конструкции всех агрегатов, узлов и деталей изделия, а также технологии их изготовления, либо опытный образец (прототип, физический объект) [26] (рис. 1 и 2).

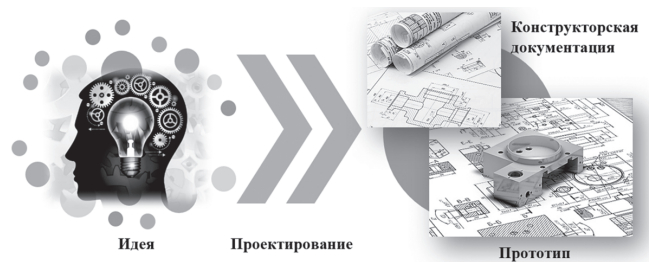


Рис. 1. Упрощенное изображение процесса проектирования объекта



Рис. 2. Стадии проектирования в жизненном цикле изделия [26]

В основе современного реверсивного инжиниринга лежит автоматизированное проектирование, в котором все проектные решения или их часть по-

лучают путем взаимодействия человека и ЭВМ, иными словами, программно-аппаратных средств. Процесс 3D-сканирования или создания цифровой копии объекта проектирования, позволяет оперативно получить трехмерную компьютерную модель исследуемого изделия при помощи аппаратного средства — 3D-сканера и программного продукта (программного обеспечения) для обработки сканов, а также систем автоматизированного проектирования (САПР или CAD) для моделирования объекта, его изучения, совершенствования конструкции. Таким образом, результатом реверсивного инжиниринга является получение адекватной цифровой модели исследуемого изделия или цифрового двойника, а также комплекта конструкторской документации, которые, в свою очередь, необходимы для получения прототипов (дубликатов) с помощью всех доступных технологий и (или) организации промышленного производства. Следует отметить, что в процессе реверсивного инжиниринга исходным (первичным) описанием объекта является реальный физический объект, а результатом проектирования — адекватная цифровая модель исследуемого изделия (CAD-модели и (или) цифровой двойник) и комплект конструкторской документации (рис. 3 и 4).



Рис. 3. Упрощённое изображение процесса реверсивного инжиниринга изделия



Рис. 4. Схема реверсивного инжиниринга изделий [3]

Сегодня технологию (метод) реверсивного инжиниринга применяют как для крупногабаритных объектов [2; 4; 13], так и для штучных изделий [29–31], в высокотехнологичных отраслях: машиностроение [5; 7; 25; 28], аэрокосмостроение [10; 22], судостроение [16; 18], а также в других областях человеческой

деятельности. Например, в дизайне одежды и элементов интерьера [8; 32], для создания копий-реплик произведений искусства [9; 20]. Применение 3D-сканирования не ограничивается сферой реверсивного инжиниринга, а широко используется и в других направлениях проектирования и производства, например, для метрологической инспекции и контроля качества [7; 13].

В сфере образования метод реверсивного инжиниринга применяют школы искусства (преимущественно для 3D-сканирования произведений искусства и собственных проектов с целью оцифровки, архивирования, прототипирования, создания виртуальных каталогов и портфолио), школы архитектуры и дизайна (для оцифровки и архивирования архитектурных макетов, их последующей доработки в CAD-системе, визуализации целевых результатов реставрации, их коррекция), а также технические (инженерные) образовательные организации (практические занятия по 3D-сканированию различных изделий) [20].

В технических вузах принципы реверсивного инжиниринга изучаются в курсе инженерной графики, курсах дополнительного образования и в рамках проектной деятельности.

Аргументами в пользу применения принципов реверсивного инжиниринга в образовательном процессе являются:

- облегчение и ускорение выполнения операций преобразования объектов и их пространственного представления, как следствие, существенное сокращение времени на выполнение графических работ, появляется возможность дальнейшего преобразования и корректировки созданных моделей;
- качественное усвоение основных понятий, методов, приобретение практических навыков и умений, развитие пространственного мышления, что способствует точному и быстрому построению обучающимися модели проектируемых технических объектов;
- облегчение и повышение качества оформления проектной и рабочей технической документации в более короткие сроки;
- применение информационных технологий в учебном процессе с целью освоения информационно-графических компетенций;
- практико-ориентированный и проектный подход в рамках учебного процесса, позволяющий быстрее адаптироваться выпускникам к производственной деятельности;
- ускорение процесса освоения некоторых разделов дисциплины и визуализация полученных результатов.

В курсе инженерной графики обучающиеся осваивают навыки проектирования при выполнении графических работ, включающих теорию и практику выполнения комплекта конструкторской документации для различных изделий (деталей и сборочных единиц). К ним относится графическая работа «Выполнение эскиза детали», процедура выполнения которой напоминает процесс реверсивного инжиниринга. Поскольку процесс проектирования обучающиеся начинают с изучения реальной детали (физического объекта), для которой разрабатывают комплект конструкторской документации (эскиз и чертёж детали) и заканчивают, как правило, построением ее 3D-модели при наличии САПР или аксонометрической проекции. Это позволяет обучающимся приобретать навыки прямого проектирования по траектории реверсивного инжиниринга.

Рассмотрим примеры инженерных задач по применению технологии реверсивного инжиниринга детали и традиционной разработки эскиза детали (рис. 5).



Рис. 5. Инженерные задачи реверсивного инжиниринга и традиционного эскизирования

Из рисунка видно, что реверсивный инжиниринг детали и эскизирование применяют при решении вопросов организации производства, в опытном производстве, ремонте и других случаях, для решения схожих, а иногда и одинаковых инженерных задач, например, «переконструирование» и (или) «доконструирование» различных изделий и конструкций. Поэтому можно констатировать, что продукты современной технологии реверсивного инжиниринга,

в некоторых случаях, в условиях производства могут заменить функцию эскиза детали. В условиях реверсивного инжиниринга обучение обогащается современным, практико-ориентированным вектором. Поэтому в образовательном процессе при изучении правил выполнения эскизов деталей целесообразно включать современный реверсивный инжиниринг детали. Что и было выполнено в Иркутском национальном исследовательском техническом университете для потока обучающихся, включающего направления подготовки в сфере информационных технологий: 10.03.01 — Информационная безопасность, 11.03.01 — Радиотехника, 11.03.02 — инфокоммуникационные технологии и системы связи, 28.03.01 — Нанотехнологии и микросистемная техника. Обучающиеся представленных направлений бакалавриата осваивают дисциплину «Инженерная и компьютерная графика» в течение учебного года, с объемом 72 часа за семестр. Раздел «эскизирование» рассматривается во втором семестре. На его освоение отводится 6 часов аудиторного времени, из них 2 часа обучающиеся изучают реверсивный инжиниринг. В процессе эскизирования обучающиеся изучают состав и конструкцию деталей заданной сборочной единицы, создают эскизы этих деталей, рабочие чертежи, аксонометрические проекции и (или) 3D-модели в среде САПР. Для создания рабочей документации и 3D-модели одной из деталей, входящей в состав сборки, осуществляют процесс реверсивного инжиниринга.

Сравним применение технологии реверсивного инжиниринга и эскизирования детали, для решения инженерной задачи получения трехмерной цифровой модели детали. В рамках учебного процесса ее можно рассматривать как ситуационную, практико-ориентированную, конструкторскую и проектную задачу, иными словами, комплексную задачу. Для этого проведем эксперимент, включающий параллельные операции реверсивного инжиниринга и эскизирования детали.

Для сканирования опытного образца использовали 3D-сканер модели *Academia 10 3D scanner* от фирмы *CREAFORM* (рис. 6). Данная модель сканера проста в использовании, подходит для учебных целей и обладает техническими характеристиками профессионального уровня (табл. 1). Использование 3D-сканера в учебном процессе позволяет обеспечить практико-ориентированное обучение в условиях вуза, включающее: освоение инженерных приложений, проектирование новых изделий, обратный инжиниринг и контроль.

В комплект со сканером входит программное обеспечение *ACADEMIA*, поддерживающего функции реверсивного инжиниринга и проверки.

В качестве физического объекта для исследования была выбрана деталь, представленная на рис. 7.

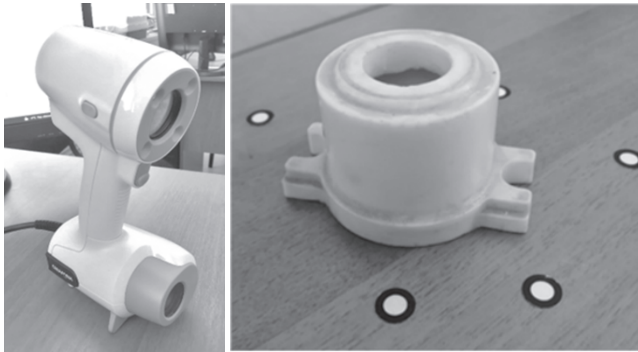


Рис. 6. Внешний вид 3D-сканера Academia 10 3D scanner

Рис. 7. Подготовленный исследуемый объект

Таблица 1

Технические характеристики 3D-сканера Academia 10 3D scanner

Техническая характеристика	Значение
Диапазон размеров деталей (рекомендуется)	0,3–3 м (1–10 футов)
Точность	до 0,250 мм (0,01 дюйма)
Объемная точность (в зависимости от размера детали)	0,500 мм/м (0,006 дюйма/фут)
Разрешение измерения	0,500 мм (0,020 дюйма)
Область сканирования	380 x 380 мм (15 x 15 дюймов)
Расстояние отступа	400 мм (15,75 дюйма)
Глубина резкости	250 мм (10 дюймов)
Источник света	белый свет (светодиод)
Лазерный класс	Н/Д
Разрешение текстуры	Н/Д
Методы позиционирования	геометрия и (или) цели
Скорость измерения	550 000 измерений/с
Масса	0,85 кг (1,9 фунта)
Размеры	(Д × Ш × В) 96 × 140 × 258 мм
Диапазон рабочей температуры	5–40 °C (41–104 °F)

Сканирование и эскизирование в общем случае выполняются по алгоритму, представленному на схеме 1.

В нашем исследовании деталь имеет простую геометрию и небольшой размер, поэтому некоторые этапы алгоритма отсутствовали.

Подготовительный этап занял всего около 2 минут, который включал:

- 1) запуск программного обеспечения — 20 с;
- 2) процесс калибровки — 15 с;
- 3) расстановка меток — 30 с.

Скорость проведения подготовительного этапа в этом случае зависит от технических характеристик компьютера, на котором проводится запуск про-



Схема 1. Этапы выполнения реверсивного инжиниринга и эскиза детали

граммного обеспечения, скорости процесса калибровки при первом использовании или после перевозки/удара и расстановки меток. Последняя операция зависит от сложности геометрии сканируемой детали и ее габаритов. Громоздкая деталь и сложная геометрия способствуют большим затратам времени.

В нашем случае, на этап 3D-сканирования детали было потрачено около 6 минут, включая:

- 1) запуск процесса сканирования — 5 с;
- 2) проведение сканером над сканируемым объектом — 300 с;
- 3) остановка процесса сканирования — 1 сек;
- 4) импорт данных в программное обеспечение.

В результате была получена 3D-модель детали (рис. 8), которая требует проведения операций постобработки.

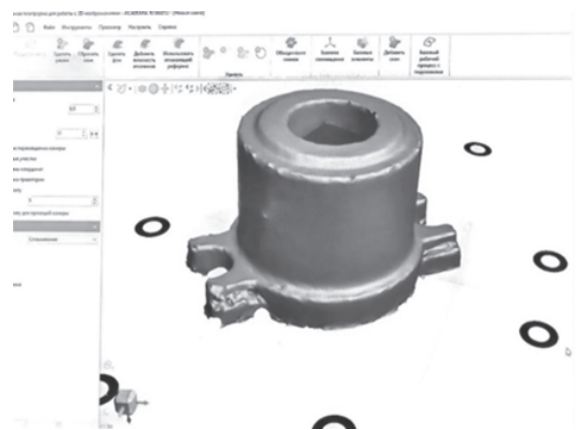


Рис. 8. Компьютерная 3D-модель исследуемого объекта

Скорость работы на данном этапе зависит от размеров и сложности конструкции детали. В некоторых случаях процесс сканирования может выполняться в несколько этапов (сессий) [17] и занять несколько часов.

В ходе нашего эксперимента этап постобработки геометрии скана проводился в течение 5 минут и включал трату времени на:

- 1) загрузка сканов в программу для обработки — 10 с;
- 2) удаление текстур и опоры — 72 с;
- 3) удаление лишних областей — 71 с;
- 4) обработка отверстий — 71 с;
- 5) сглаживание — 71 с;
- 6) сохранение — 5 с.

В общем случае на операции постобработки *3D*-модели может уйти до 2–3 полных рабочих дней. Скорость зависит от требуемой точности, сложности геометрии детали и технических характеристик сканера. Профессиональные сканеры выдают такую точность, что постобработка сводится к минимуму и осуществляется очень быстро. Иными словами, чем «профессиональнее» сканнер, тем проще и быстрее процесс редактирования *3D*-модели.

В результате на весь процесс реверсивного инжиниринга исследуемой детали ушло не более 15 минут, в то время как на эскизирование вручную, построение рабочего чертежа и создание *3D*-модели детали с помощью САПР — более 80 минут, с учетом того, что эти операции выполнял не новичок. Таким образом, процесс реверсивного инжиниринга детали осуществляется гораздо быстрее (в нашем случае более, чем в 5 раз), чем построение эскиза детали от подготовительного этапа до готовой *3D*-модели детали. Таким образом, проектирование в рамках темы «эскиз детали» можно дополнить технологией реверсивного инжиниринга на примере «простой» детали.

Однако следует отметить, что в условиях «реального» обратного инжиниринга остаются два спорных момента, которые являются основой для новых научных исследований в этой области. Во-первых, временные затраты на сканирование и создание адекватной *3D*-модели в случае конструктивно-сложных деталей и/или изделий могут быть не сопоставимыми с таковыми при эскизировании и создании *3D*-модели в среде САПР. Во-вторых, невозможно однозначно определить с какой из этих моделей (*3D*-модель — результат реверсивного инжиниринга или *3D*-модель — результат геометрического моде-

лирования в среде САПР) будет удобней вести необходимые преобразования объекта проектирования и документирование (оформление комплекта конструкторской документации).

В заключение отметим, что технологии реверсивного инжиниринга могут быть органически вписаны в графический практикум инженерной графики с целью повышения интенсивности и эффективности обучения, поскольку их рациональное внедрение в учебный процесс в рамках дисциплины «Инженерная графика» заменяет механическую, рутинную ручную работу и способствует развитию творческой и познавательной активности обучающихся, обеспечивает выполнение важного принципа учебного процесса — целесообразное гармоничное сочетание традиционных технологий графической подготовки и современных информационных технологий.

Заключение

Современные инженеры должны уверенно владеть комплексом знаний и навыков в области проектирования, проведения технико-экономических расчетов, оформления проектно-технической документации согласно стандартам единой системы конструкторской документации, в том числе с применением современных информационных технологий.

Применение в учебном процессе современных систем проектирования САД/САМ привносит в него элементы инновации и при кажущемся облегчении умственной деятельности, на самом деле повышает интеллектуальный интерес обучающегося, активизирует его мышление.

Применение реверсивного инжиниринга в методике обучения инженерной графике обладает следующими преимуществами:

- при выполнении работы по конструированию объектов происходит интеграция знаний из различных областей знаний, что способствует эффективному формированию конструкторского мышления;
- практико-ориентированные элементы учебной деятельности мощно повышают мотивационную составляющую учебного процесса.

Таким образом, технология реверсивного инжиниринга, объединяя в себе несколько тем дисциплины, может применяться в курсе инженерной графики в качестве комплексной прикладной задачи и метода выполнения расчетно-графических работ.

Литература

1. *Бояшова Е.П.* Особенности дистанционного обучения геометро-графическим дисциплинам с использованием методов конструктивного геометрического моделирования [Текст] / Е.П. Бояшова // Геометрия и графика. — 2021. — № 3. — С. 46–56. — DOI: 10.12737/2308-4898-2021-9-3-46-56.
2. *Вавулин М.В.* Технологии трехмерной оцифровки крупных автономных археологических объектов [Текст] / М.В. Вавулин // Вестник Том. гос. ун-та. — 2016. — № 407. — С. 55–60.
3. *Гришаев А.Н.* Методика и практика 3d-сканирования объектов в задачах реверс-инжиниринга [Текст] / А.Н. Гришаев, В.И. Луцейкович // Материалы докладов 51-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. (Витебск, 25 апреля 2018 года). — 2018. — Т. 2. — С. 309–311.
4. *Зайцева О.В.* «3D-революция» в археологической фиксации в российской перспективе [Текст] / О.В. Зайцева // Сибирские исторические исследования. — 2014. — № 4. — С. 10–20.
5. *Зобов П.Г.* Сравнительный анализ сканирования мелкогогабаритных судовых изделий машиностроительной части со сложной внутренней конструкцией при помощи различных моделей 3D-сканеров [Текст] / П.Г. Зобов, А.В. Дектярев, В.Н. Морозов // Известия КГТУ. — 2020. — № 56. — С. 159–171.
6. *Игнатъев С.А.* Повышение наглядности представления изучаемых в начертательной геометрии объектов [Текст] / С.А. Игнатъев, Э.Х. Муратбаев, М.В. Воронина // Геометрия и графика. — 2022. — № 1. — С. 44–53. — DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-44-53.
7. *Караваев Я.С.* Увеличение производительности крупногабаритных литых деталей в машиностроении путем отсеивания негодных заготовок с помощью 3Б-сканирования [Текст] / Я.С. Караваев, В.Ю. Новиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2017. — № 1. — С. 104–108.
8. *Коковина М.В.* Аддитивные технологии в дизайне модных изделий. применение реверс-инжиниринга для упрощения 3D-моделирования и печати из pla plastic для создания элементов фирменного стиля и аксессуаров [Текст] / М.В. Коковина // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Инновации и дизайн». — 2020. — № 1. — С. 55–57.
9. *Коржов Е.Г.* Компьютерные технологии реинжиниринга для производства и реставрации скульптурных объектов [Текст] / Е.Г. Коржов, Ю.А. Павлов // ГИАБ. — 2010. — № 3. — С. 230-239.
10. *Куркин Е.И.* Многоуровневый подход при проектировании конструкций аэрокосмического назначения из перспективных материалов [Текст] / Е.И. Куркин, В.О. Садыкова, М.О. Спирина // Решетневские чтения. — 2017. — № 21-1. — С. 26–27.
11. *Лепаров М.Н.* О науке «Геометрия технических объектов» [Текст] / М.Н. Лепаров // Геометрия и графика. — 2019. — № 2. — С. 28-38. — DOI: 10.12737/article_5d2c187251b6c8.21632403.
12. *Лепаров М.Н.* О геометрии, еще один раз [Текст] / М.Н. Лепаров // Геометрия и графика. — 2022. — № 1. — С. 3–13. — DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-3-13.
13. *Медведев О.А., Тараканов А.Ю.* Способ лазерного 3D-сканирования оперативного определения степени деформированности сооружения, имеющего сложную конструктивную форму. Патент РФ, № 2572056, 2015.
14. *Мусаева Т.В.* Дополненная реальность в проведении занятий по инженерным техническим дисциплинам проектирования [Текст] / Т.В. Мусаева, А.А. Ураго // Геометрия и графика. — 2021. — № 2. — С. 46–55. — DOI: 10.12737/2308-4898-2021-9-2-46-55.
15. *Назарова О.Н.* Адаптация дисциплины «прикладная геометрия» к программам бакалавриата эксплуатационных направлений авиационного вуза [Текст] / О.Н. Назарова // Геометрия и графика. — 2020. — № 1. — С. 57–64. — DOI: 10.12737/2308-4898-2020-57-64.
16. *Никитин В.С.* Научно-техническое сопровождение создания кораблей и судов [Текст] / В.С. Никитин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 1. — С. 5–12.
17. *Никонова Т.Ю.* Использование САПР для обработки результатов сканирования 3D-сканером HandySCAN 300 деталей машиностроения / Т.Ю. Никонова, Д.З. Мухамедьяров, Н.С. Кузнецов. — URL: <http://sci-conf.ru/archive/VIII/articles/nikonova-t-yu-ispolzovanie-sapr-dlya-obrabotki-rezultatov-skanirovaniya-3d-skanerom-handyscan-300-detaley-mashinostroeniya.pdf> (дата обращения: 13.09.2022).
18. *Петров А.Л.* Применение технологии реверс-инжиниринга в судостроении [Текст] / А.Л. Петров, Л.С. Баева, Н.Е. Петрова, Ж.В. Кумова // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. — 2020. — № 1. — С. 34–37.
19. *Сальков Н.А.* Геометрическая составляющая технических инноваций [Текст] / Н.А. Сальков // Геометрия и графика. — 2018. — № 2. — С. 85–93. — DOI: 10.12737/article_5b55a5163fa053.07622109.
20. *Скрипничук Е.В.* Реверсивный инжиниринг [Текст] / Е.В. Скрипничук, Е.С. Решетникова // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. — 2021. — № 20. — С. 238–245.
21. *Столбова И.Д.* К вопросу о готовности преподавательских кадров к цифровому обучению [Текст] / И.Д. Столбова, К.Г. Носов, Л.С. Тарасова // Геометрия и графика. — 2022. — № 1. — С. 24–35. — DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-24-35.
22. *Тимошев П.В.* Применение технологии 3D сканирования при производстве изделий ракетно-космической техники [Текст] / П.В. Тимошев, А.В. Тоньшина // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2019. — С. 283–285.

23. Турутина Т.Ф. Применение информационных технологий в методике проверки графической грамотности будущих специалистов [Текст] / Т.Ф. Турутина, Д.В. Третьяков // Геометрия и графика. — 2020. — № 1. — С. 45–56. — DOI: 10.12737/2308-4898-2020-45-56.
24. Усатая Т.В. Современные подходы к проектированию изделий в процессе обучения студентов компьютерной графике [Текст] / Т.В. Усатая, Л.В. Дерябина, Е.С. Решетникова // Геометрия и графика. — 2019. — № 1. — С. 74–82. — DOI: 10.12737/article_5c91fd2bde0ff7.07282102.
25. Шаблий Л.С. Реверс-инжиниринг компрессорного лопаточного профиля: построение средней линии и симметричного профиля [Текст] / Л.С. Шаблий // Вестник СГАУ. — 2012. — С. 229–234.
26. Шестопалов К.К. Основы автоматизированного проектирования [Текст]: учеб. пособие / К.К. Шестопалов, А.Н. Новиков. — 2-е изд., испр. — М.: Изд-во МАДИ, 2017. — 96 с.
27. Ширшова И.А. Современные подходы к формированию геометро-графической подготовки в технических вузах [Текст] / И.А. Ширшова, М.Л. Мухина // Научно-методический электронный журнал «Концепт». — 2017. — № V8. — URL: <http://e-koncept.ru/2017/171004.htm> (дата обращения: 13.09.2022).
28. Dúbravčík M., Kender Š. Application of Reverse Engineering Techniques in Mechanics System Services. *Procedia Engineering*. 2012, I. 48, pp. 96–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.491.
29. Elizondo A., Reinert F. Limits and hurdles of Reverse Engineering for the replication of parts by Additive Manufacturing (Selective Laser Melting). *Procedia Manufacturing*, 2019, I. 41, pp. 1009–1016. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.10.027.1.
30. Engel B., Al-Maeni S.S.H. An Integrated Reverse Engineering and Failure Analysis Approach for Recovery of Mechanical Shafts. *Procedia CIRP*. 2019, I. 81, pp. 1083–1088. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.257.
31. Paulic M., Irgolic T., Balic J., Cus F., Cupar A., Brajlilh T., Drstvensek I. Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing. *Procedia Engineering*, 2014, I. 69, pp. 795–803. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.056.
32. Wang P., Yang J., Hu Y., Huo J., Feng X. Innovative design of a helmet based on reverse engineering and 3D printing. *Alexandria Engineering Journal*. 2021, I. 60, pp. 3445–3453. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.006.
- V. 9, I. 3, pp. 46–56. DOI: 10.12737/2308-4898-2021-9-3-46-56. (in Russian)
2. Vavulin M.V. 3D digitizing of large separate artifacts [Tekhnologii trekhmernoy otsifrovki krupnykh avtonomnykh arkhologicheskikh ob'yektov]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2016, I. 407, pp. 55–60. (in Russian)
3. Grishaev A.N., Lutseikovich V.I. Metodika i praktika 3d-skanirovaniya ob'yektov v zadachakh revers-inzhiniringa [Methods and practice of 3d-scanning of objects in reverse engineering tasks]. *Materialy dokladov 51-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov* [Materials of reports of the 51st international scientific and technical conference of teachers and students. (Vitebsk, April 25, 2018)]. 2018, V. 2, pp. 309–311. (in Russian)
4. Zaytseva O.V. 3D Revolution" In Archaeological Recording In Russian Perspective [«3D revolyutsiya» v arkhologicheskoy fiksatsii v rossiyskoy perspective]. *Sibirskiye istoricheskiye issledovaniya* [Siberian historical research]. 2014, I. 4, pp. 10–20. (in Russian)
5. Zobov P.G., Dektyarev A.V., Morozov V.N. Comparatative analysis of the scanning of small-sized shipboard products of an engineering part with a complex internal structure using various models of 3d scanners [Srvnitel'nyy analiz skanirovaniya melkogabaritnykh sudovykh izdeliy mashinostroitel'noy chasti so slozhnoy vnutrenney konstruktivnoy pri pomoshchi razlichnykh modeley 3D-skanerov]. *Izvestiya KGTU* [News of KSTU]. 2020, I. 56, pp. 159–171. (in Russian)
6. Ignat'ev S.A., Muratbakeev E.H., Voronina M.V. Increasing the visibility of representation for objects studying in descriptive geometry [Povysheniye naglyadnosti predstavleniya izuchayemykh v nachertatel'noy geometrii ob'yektov]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2022, V. 10, I. 1, pp. 44–53. DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-44-53. (in Russian)
7. Karavaev Ya.S., Novikov V.Yu. Increasing productivity by sieving not fit oversized cast billets by 3d scanning [Uvelicheniye proizvoditel'nosti krupnogabaritnykh litykh detaley v mashinostroyenii putem otseivaniya negodnykh zagotovok s pomoshch'yu 3D-skanirovaniya]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2017, I. 1, pp. 104–108. (in Russian)
8. Kokovina M.V. Additive technologies in fashion design. the use of reverse engineering to simplify 3D modeling and printing from pla plastic to create corporate identity elements and accessories [Additivnyye tekhnologii v dizayne modnykh izdeliy. primeneniye revers-inzhiniringa dlya uproscheniya 3D modelirovaniya i pechati iz pla plastic dlya sozdaniya elementov firmennogo stilya i aksesuarov]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «innovatsii i dizayn»* [Collection of proceedings of the international scientific and practical conference «innovations and design»]. 2020, I. 1, pp. 55–57. (in Russian)

References

1. Boyashova E.P. Features of distance learning in geometric and graphic disciplines using methods of constructive geometric modeling [Osobennosti distantsionnogo obucheniya geometro-graficheskimi distsiplinami s ispol'zovaniyem metodov konstruktivnogo geometricheskogo modelirovaniya]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2021,

9. Korzhov E.G., Pavlov Yu.A. Computer technologies of reengineering for the production and restoration of sculptural objects [Komp'yuternyye tekhnologii reinzheniringa dlya proizvodstva i restavratsii skulpturnykh ob'yektov]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2010, I. 3, pp. 230–239. (in Russian)
10. Kurkin E.I., Sadykova V.O., Spirina M.O. Multi-level approach for aerospace design from perspective materials [Mnogourovnevyy podkhod pri proyektirovanii konstruksiy aerokosmicheskogo naznacheniya iz perspektivnykh materialov]. *Reshetnevskiy chteniya* [Reshetnev readings]. 2017, no. 21-1, pp. 26–27. (In Russian)
11. Leparov M.N. About the science «geometry of technical objects» [O nauke «Geometriya tekhnicheskikh ob'yektov»]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2019, V. 7, I. 2, pp. 28–38. DOI: 10.12737/article_5d2c187251b6c8.21632403. (in Russian)
12. Leparov M.N. About geometry, one more time [O geometrii, yeshche odin raz]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2022, V. 10, I. 1, pp. 3–13. DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-3-13. (in Russian)
13. Medvedev O.A., Tarakanov A.Yu. *Sposob lazernogo 3D skanirovaniya operativnogo opredeleniya stepeni deformirovannosti sooruzheniya, imeyushchego slozhnuyu konstruktivnyuyu formu* [Method of laser 3d scanning of operative definition of deformation degree of structure having complex structural shape]. Patent RF. I. 2572056. 2015. (in Russian)
14. Musaeva T.V., Urago A.A. Augmented reality in conducting classes in engineering and technical disciplines of design [Dopolnennaya real'nost' v provedenii zanyatiy po inzhenernym tekhnicheskim distsiplinam proyektirovaniya]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2021, V. 9, I. 2, pp. 46–55. DOI: 10.12737/2308-4898-2021-9-2-46-55. (in Russian)
15. Nazarova O.N. «Applied geometry» discipline adaptation to undergraduate for exploitative specialities of an aviation high educational institution [Adaptatsiya distsipliny «prikladnaya geometriya» k programmam bakalavriata ekspluatatsionnykh napravleniy aviatsionnogo vuza]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2020, V. 8, I. 1, pp. 57–64. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-57-64. (in Russian)
16. Nikitin V.S. R&D support to ship design and construction [Nauchno-tekhnicheskoye soprovozhdeniye sozdaniya korablya i sudov]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylovsky State Scientific Center]. 2018, I. 1, pp. 5–12. (in Russian)
17. Nikonova T.Yu., Mukhamedyarov D.Z., Kuznetsov N.S. Using CAD to process the results of scanning with a HandySCAN 300 3D scanner of machine building parts [Ispol'zovaniye SAPR dlya obrabotki rezul'tatov skanirovaniya 3D-skanerom HandySCAN 300 detaley mashinostroyeniya]. URL: <http://sci-conf.ru/archive/VIII/articles/nikonova-t-yu-ispolzovanie-sapr-dlya-obrabotki-rezultatov-skanirovaniya-3d-skanerom-handyscan-300-detaley-mashinostroyeniya.pdf> (accessed: 13 August 2022). (in Russian)
18. Petrov A.L., Baeva L.S., Petrova N.E., Kumova Zh.V. Application of reverse engineering technology in shipbuilding [Primeneniye tekhnologii revers-inzhiniringa v sudostroyenii]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Arkticheskiy region* [News of higher educational institutions. Arctic region]. 2020, I. 1, pp. 34–37. (in Russian)
19. Sal'kov N.A. The geometric component of technical innovations [Geometricheskaya sostavlyayushchaya tekhnicheskikh innovatsiy]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2018, V. 6, I. 2, pp. 85–93. DOI: 10.12737/article_5b55a5163fa053.07622109. (in Russian)
20. Skripnichuk E.V., Reshetnikova E.S. Reverse engineering [Reversivnyy inzhiniring]. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroyeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing]. 2021, I. 20, pp. 238–245. (in Russian)
- Stolbova I.D., Nosov K.G., Tarasova L.S. To the question of teaching staff readiness to digital training [K voprosu o gotovnosti prepodavatel'skikh kadrov k tsifrovomu obucheniyu]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2022, V. 10, I. 1, pp. 24–35. DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-24-35. (in Russian)
21. Timoshev P.V., Tonshina A.V. Application 3d scanning technology for production of space rocket engineering products [Primeneniye tekhnologii 3D skanirovaniya pri proizvodstve izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki]. *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and astronautics]. 2019, pp. 283–285. (in Russian)
22. Turutina T.F, Tret'yakov D.V. Application of information technologies in checking procedure of future specialists' graphic literacy [Primeneniye informatsionnykh tekhnologiy v metodike proverki graficheskoy gramotnosti budushchikh spetsialistov]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2020, V. 8, I. 1, pp. 45–56. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-45-56. (in Russian)
23. Usataya T.V., Deryabina L.V., Reshetnikova E.S. Modern approaches to products design in the process of students teaching in computer graphics [Sovremennyye podkhody k proyektirovaniyu izdeliy v protsesse obucheniya studentov komp'yuternoy grafike]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2019, V. 7, I. 1, pp. 74–82. DOI: 10.12737/article_5c91fd2bde0ff7.07282102. (in Russian)
24. Shabliy L.S. Compressor blade profile reverse-engineering: building of middle curve and symmetrical profile [Revers-inzhiniring kompressornogo lopatochnogo profilya: postroyeniye sredney linii i simmetrichnogo profilya]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* («Vestnik SGAU») [Vestnik of the Samara State Aerospace University] (“Vestnik SSAU”). 2012, pp. 229–234. (in Russian)
25. Shestopalov K.K., Novikov A.N. Fundamentals of computer-aided design [Osnovy avtomatizirovannogo proyektirovaniya]: textbook. Allowance. 2nd ed., corrected. Moscow. Publ. MADI. 2017. 96 p. (in Russian)

26. Shirshova I.A., Mukhina M.L. Modern approaches to the formation of geometric and graphic training in technical universities [Sovremennyye podkhody k formirovaniyu geometro-graficheskoy podgotovki v tekhnicheskikh vuzakh]. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal «Kontsept»* [Scientific and methodological electronic journal "Concept"], 2017, I. V8. URL: <http://e-koncept.ru/2017/171004.htm> (accessed: 16 August 2022). (in Russian)
27. Dúbravčík M., Kender Š. Application of Reverse Engineering Techniques in Mechanics System Services. *Procedia Engineering*. 2012, I. 48, pp. 96–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.491.
28. Elizondo A., Reinert F. Limits and hurdles of Reverse Engineering for the replication of parts by Additive Manufacturing (Selective Laser Melting). *Procedia Manufacturing*. 2019, I. 41, pp. 1009–1016. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.10.027.1.
29. Engel B., Al-Maeeni S.S.H. An Integrated Reverse Engineering and Failure Analysis Approach for Recovery of Mechanical Shafts. *Procedia CIRP*. 2019, I. 81, pp. 1083–1088. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.257.
30. Paulic M., Irgolic T., Balic J., Cus F., Cupar A., Brajlilj T., Drstvensek I. Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing. *Procedia Engineering*. 2014, I. 69, pp. 795–803. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.056.
31. Wang P., Yang J., Hu Y., Huo J., Feng X. Innovative design of a helmet based on reverse engineering and 3D printing. *Alexandria Engineering Journal*. 2021, I. 60, pp. 3445–3453. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.006.