

Труды МАИ. 2024. № 137
Trudy MAI, 2024, no. 137

Научная статья

УДК 004.9

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181895>

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ НАПЕЧАТАННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ФОТОПОЛИМЕРНОМ ПРИНТЕРЕ ЗА СЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПЕЧАТИ

Надежда Андреевна Вехтева¹, Юрий Владимирович Литовка²✉,

Артем Дмитриевич Обухов³

^{1,2,3}Тамбовский государственный технический университет, ТГТУ,

Тамбов, Россия

¹magicanloner@gmail.com

²polychem@list.ru ✉

³Obuhov.art@gmail.com

Аннотация: В данной статье рассматривается подход к анализу трехмерной цифровой модели изделия, оценке точности печати ее элементов, а также скорости процесса печати. Описываются основные виды дефектов, возникающих при трехмерной печати, и их зависимость от размещения элементов в пространстве печати.

Центральным вопросом исследования является технология фотополимеризации DLP и возникающие дефекты на готовом изделии. Описаны наиболее распространенные типы дефектов, а также рассмотрено влияние расположения элементов в пространстве печати.

Для анализа и оценки точности печати используются различные методы, обнаруживающие и описывающие дефекты, такие как образование ступенек, отклонения размеров и ошибки формы. Также дана классификация элементов трехмерного чертежа, для которых возможно появление упомянутых дефектов.

Статья также рассматривает проблему снижения точности и увеличения количества дефектов из-за увеличения скорости печати. Основная задача описываемого подхода заключается в поиске оптимального баланса между скоростью и точностью. Авторы предлагают подход к достижению оптимального баланса путем изменения угла поворота модели до установки поддержек и нарезки ее на слои для печати. Описанный подход включает в себя задание весовых коэффициентов важности выбранных классов дефектов и поиск деформируемых элементов трехмерного чертежа, определение их характеристик и вычисление отклонений. Решение многокритериальной задачи выполняется методом эффективности по Парето, находящим оптимальные решения между соответствием изделия чертежу и временем печати.

Для количественной оценки соответствия готового изделия чертежу был предложен и рассмотрен метод, использующий функцию полезности. В этом методе классы дефектов элементов чертежа выбираются в качестве критериев, а весовые коэффициенты представляют собой значимость отсутствия выбранного дефекта на готовом изделии.

Ключевые слова: трехмерная фотополимерная печать, оценка точности печати, функция полезности

Для цитирования: Вехтева Н.А., Литовка Ю.В., Обухов А.Д. Повышение точности напечатанных изделий на фотополимерном принтере за счет преобразования положения в области печати // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181895>

Original article

INCREASING THE ACCURACY OF PRINTED PRODUCTS ON A PHOTOPOLYMER PRINTER DUE TO TRANSFORMATION OF THE POSITION IN THE PRINTING AREA

Nadezhda A. Vekhteva¹, Yuri V. Litovka²✉, Artem D. Obukhov³

^{1,2,3}Tambov State Technical University, TSTU, Tambov, Russia

¹magicanloner@gmail.com

²polychem@list.ru✉

³Obuhov.art@gmail.com

Abstract. The presented article regards an approach to analysis of a product 3D digital model, printing accuracy assessing of its elements, the speed of the printing process, and describes the main types of defects that occur during three-dimensional printing and their dependence on the placement of elements in the printing space.

The central issue of the research is the DLP photopolymerization technology and the resulting defects in the finished product. The article describes the most common types of defects, and considers the impact of the elements arrangement in the print space.

Various methods, detecting and describing defects, such as jog formation, size drift and shape deviations, are employed for the printing analysis and accuracy assessment. The 3D drawing elements classification, in which the above said defects may occur, is presented as well.

The article addresses also the problem of accuracy degradation and increased number of defects due to the printing speed increasing. The main task of the described approach consists in finding the optimal balance between the speed and accuracy. The authors propose an approach to optimal balance achieving by changing the model angle of rotation prior to installing supports and slicing it into layers for printing. The described approach includes setting weighting coefficients of importance of the selected classes of defects and searching for deformable elements of a 3D drawing, determining their characteristics and computing deviations. The multi-criteria problem solution is being performed by the Pareto efficiency method, which finds optimal solutions between product compliance with the drawing and printing time.

To quantify the finished product conformity to the drawing, a method using the utility function, was proposed and considered. In this method, classes of the drawing elements defects are being selected as criteria, and weighting coefficients represent the significance of the selected defect absence on the finished product.

Keywords: accuracy assessment, printing, three-dimensional photopolymer printing, utility function

For citation: Vekhteva N.A., Litovka Yu.V., Obukhov A.D. Increasing the accuracy of printed products on a photopolymer printer due to transformation of the position in the

1. Введение

Трёхмерная печать является актуальной и перспективной технологией, которая, благодаря разнообразию материалов и оборудования, может быть применена в различных сферах, например, для печати протезов, частей механических устройств, летательных аппаратов, прототипов, макетов и других объектов. Технологии 3D-печати позволяют создавать ранее недоступные сложные формы, например, сотовые структуры, криволинейные пространственные поверхности, внутренние каналы, имеющие изгибы, и прочие поверхности, изготовление которых традиционными способами невозможно или весьма трудоёмко. Например, компоненты авиационных двигателей имеют сложную геометрию, которую трудно, неэффективно и в некоторых случаях невозможно изготовить с применением обычных методов механической обработки [1-3]. Для каждой задачи в конкретной сфере могут применяться различные технологии и, соответственно, материалы печати, что позволяет придать изделию нужные свойства [4-5].

Наиболее общедоступными на данный момент выступают технологии FDM (fused deposition modeling, методика послойного направления пластиковой нити) и технология микростереолитография SLA (stereolithography, лазерная стереолитография). Так же существует технология DLP-печати (Digital Light

Processing, цифровая обработка света), которая является достаточно популярным методом трехмерной печати, однако она не так широко распространена, как выше описанные технологии. Именно об DLP будет вестись дальнейшее повествование.

Данная технология основана на фотополимеризации, управляемой цифровым проектором. Фотополимерная печать – это метод аддитивного производства, при котором объект создается путем последовательного нанесения и отверждения слоев фотополимерного материала с использованием специального принтера. Фотополимеризация – это образование полимеров под действием света, главным образом ультрафиолетового излучения [6-7]. Каждый слой прожигается по очереди, создавая трехмерный объект, за счет чего обеспечивается высокое качество и точность изготовления деталей. DLP используется в основном в промышленных или профессиональных приложениях. В настоящее время скорость DLP-печати в несколько раз превосходит скорость печати методов FDM и SLA [8].

Производство изделий с помощью трехмерной печати можно условно разделить на две стадии.

Первая стадия – создание CAD-модели (трехмерного цифрового чертежа), ее перевод в STL-файл и редактирование, нарезка на слои и перевод в формат, соответствующий используемому принтеру.

Вторая стадия – 3D-печать и последующая обработка изделия [9].

Принтер для трехмерной печати состоит из нескольких компонентов, включая платформу печати, ванночку для смолы с прозрачной пленкой на дне, матрицу и устройства для передачи ультрафиолетовых лучей. Платформа построения

опускается в ванночку со смолой, а затем нужный фрагмент слоя засвечивается снизу ванночки через пленку. После этого платформа поднимается для окончательной фотополимеризации слоя, и через несколько секунд процесс повторяется для следующего слоя. Таким образом, объект постепенно формируется из множества тонких слоев [10].

Последним шагом первого этапа является преобразование данных трехмерного чертежа в набор данных (формирование слоев печати), понятных принтеру, с помощью специальных программ-слайсеров, большинство из которых поставляется вместе с устройством печати. Слайсер позволяет расположить трехмерный чертеж в области печати, по необходимости изменить размер и поворот относительно платформы построения, а также расставить дополнительные конструкционные элементы – поддержки. Зачастую эти программы уже содержат в своих базах возможные варианты расположения чертежа и функцию автоматической расстановки поддержек в критических местах чертежа, где плоскости нависают над платформой построения [11].

При печати прототипов и моделей с геометрически сложными элементами возможно возникновение дефектов продукции, обусловленных параметрами печати и характеристиками используемых материалов, а также неправильным положением трехмерной модели относительно платформы построения в пространстве области печати. Программы для нарезки моделей в данном случае не всегда корректно размещают чертеж, из-за чего необходимо будет провести дополнительные тестовые печати для получения значения характеристик, удовлетворяющих поставленной

задаче. Расположение, в частности, угол поворота чертежа относительно платформы построения может частично или полностью влиять на возникновение следующих дефектов печати [12].

Образование ступенчатости. Светочувствительный материал полимеризуется постепенно, слой за слоем, и если модель неправильно выровнена, то на каждом слое возникают небольшие смещения, которые в итоге формируют ступени. Решением может выступать использование дополнительных конструкций устройства печати или изменение отображения слоя печати [13-14].

Сколы, пропуски печати. Пленка на дне ванны имеет определенную упругость, а смола конкретную вязкость, и при поднятии платформы построения тонкий слой может изгибаться в момент отрыва, что в конечном итоге может привести к искажению или образованию разрыва в наиболее искаженной части. Решением данной проблемы являются изменение скорости печати (увеличение времени простоя платформы и другие) или отслеживание искажения с помощью дополнительных камер с использованием цифрового зрения и последующими действиями по устранению проблемы. Если изменить расположение этих элементов таким образом, чтобы натяжение стало незначительным для образования разрыва, то также возможно избежать образования деформаций [15-16].

Излишки или недостаток материала на изделии. Данный дефект может возникнуть при отделении поддержек от готового изделия, а также при печати мелких и близко расположенных (относительно толщины слоя) элементов чертежа. В незначительных местах готового изделия (плоских поверхностях, конструкционно

скрытых частях) дефект не представляет проблемы, в отличие от детализированных частей или при большой площади поражения.

Отклонение от заданных размеров чертежа. Большинство современных трехмерных принтеров доставляют хорошую точность печати. [17]. Отклонения размеров может произойти в связи с образованием выше перечисленных проблем, а также из-за самой послойной технологии печати. Печать слоев происходит параллельно друг к другу, и, если на чертеже какой-то элемент, например, имел острый угол, то при не перпендикулярном расположении к платформе построения, он может изменить свои размеры.

Демонстрация возможных деформаций при фотополимерной печати представлены на рисунке 1.

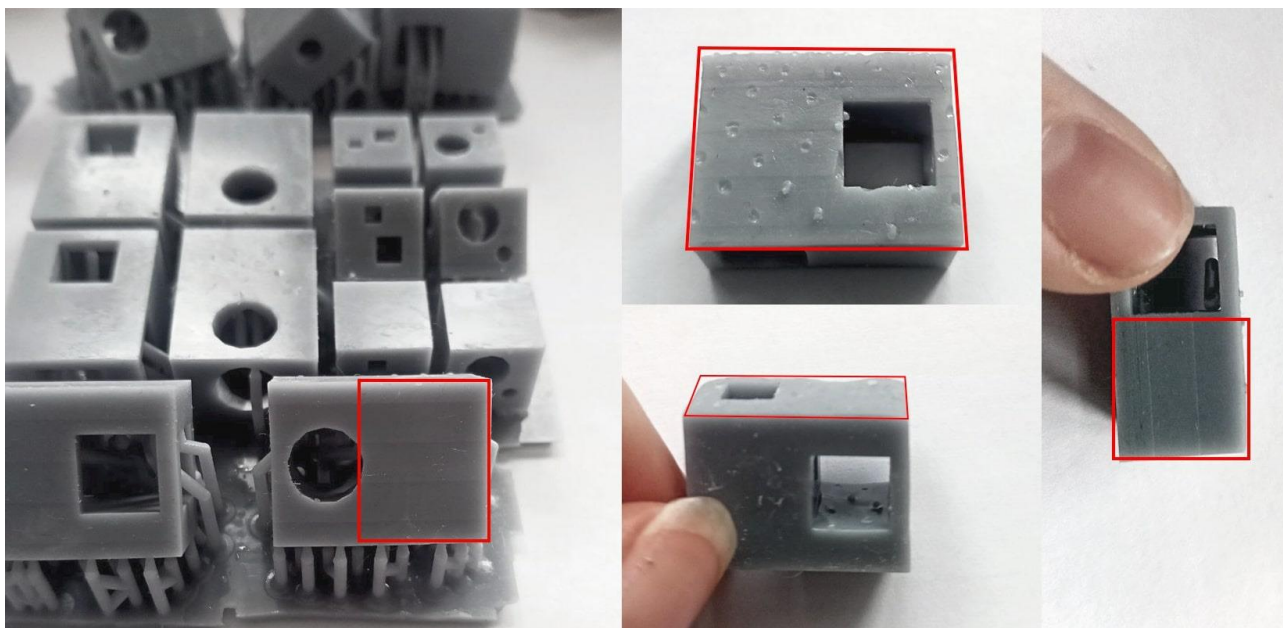


Рис. 1. Демонстрация распечатанного изделия и наличие визуальных дефектов.

Изменение угла поворота модели для предотвращения появления того или иного вида дефекта может привести к изменению скорости печати. При

использовании технологии фотополимеризации, на скорость печати напрямую влияет размер изделия по направлению, перпендикулярному платформе построения (без учета настроек печати принтера, таких как время отвержения и движения платформы). Обозначим данное измерение как «высота». Уменьшить высоту изделия можно за счет изменения положения трехмерного чертежа в области печати таким образом, чтобы сторона с минимальным значением длины была вдоль оси перпендикулярной платформе построения. На рисунке 2 приведено два расположения трехмерного чертежа изогнутой трубы, при этом для печати трубы под буквой «а» требуется около трех с половиной часов, а для трубы под буквой «б» около часа, хотя их форма абсолютно идентична.

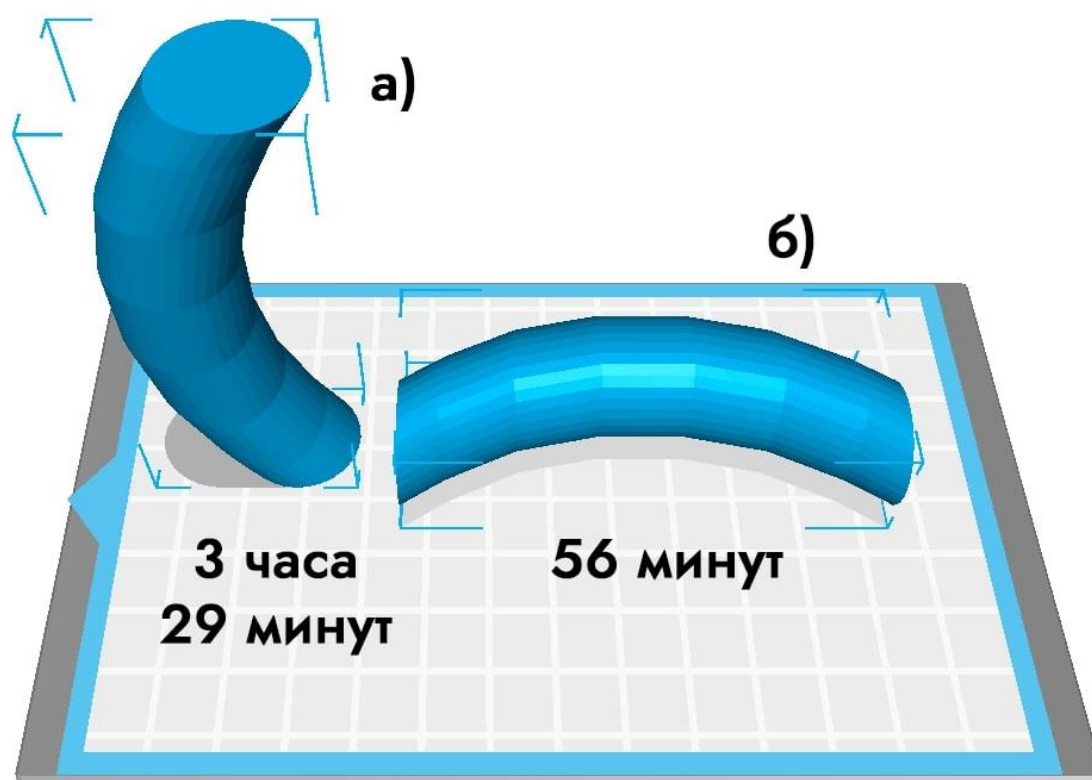


Рис. 2. Сравнение времени печати изделия: а) максимальная высота чертежа;
б) минимальная высота чертежа.

Изготовление изделия, соответствующее исходным значениям трехмерного чертежа, за возможное наименьшее время печати является сложной задачей, и возникает вопрос о приоритете точности изделия или времени изготовления.

При производстве с помощью трехмерной печати основной целью является получение изделия, максимально близкого к трехмерному чертежу (минимум дефектов, совпадение размеров) за наиболее короткий срок.

Авторы предполагают, что создание системы поддержки принятия решений по организации трехмерной печати, учитывающей различные аспекты, не связанные с техническими характеристиками принтера, может позволить производителям достичь поставленной цели. При этом система должна отличаться и превосходить программы-слайсеры. В данной статье будет представлено исследование, нацеленное на одновременное устранение, уменьшение возникновения ранее упомянутых дефектов печати и возможное сокращение времени печати путем изменения ориентации трехмерной модели в зависимости от поставленной задачи. Этот аспект может стать одной из составляющих новой системы поддержки принятия решений.

2. Постановка задачи

Задачи уменьшения наличия дефектов и увеличения скорости печати могут противоречить друг другу, и при их объединении формируется многокритериальная задача. Для ее решения можно использовать оптимизационный подход. Для начала необходимо определить целевые функции, которые будут оценивать качество

изделия и время печати. Качество изделия будет оцениваться по количеству дефектов и точности соответствия трехмерного чертежа [18-20].

Выдвинем гипотезу о том, что оптимизация угла наклона модели при фотополимерной печати является важным аспектом, который может помочь достичь наилучшего соответствия между трехмерным чертежом и напечатанным изделием.

Степень деформаций зависит от различных факторов, таких как размеры, ширина, высота и площадь элементов трехмерного чертежа. К примеру, после проведения нескольких тестовых печатей было обнаружено, что цилиндрические выпуклости длиной более трех сантиметров при диаметре 0,5 мм склонны к изгибу, в то время как при меньшей длине данного дефекта не наблюдалось. Расположение элемента трехмерного чертежа может влиять на образование деформации готового изделия в разной степени. Они могут быть как сильно выражены, так и незначительно, в зависимости от конкретных условий печати, характеристик чертежа и требований к изделию.

Из анализа предыдущего опыта печати на фотополимерном принтере было выявлено, что части изделий с определенными геометрическими особенностями, такими как плоскости, выпуклости, отверстия и вырезы, подвержены наибольшему риску искажения. Именно эти элементы трехмерного чертежа в дальнейшем будут подвержены анализу на возникновение деформаций.

Когда речь идет о нахождении оптимального угла наклона модели необходимо также учитывать ограничения в размерах устройства печати [21]. Границы чертежа не должны превышать допустимых размеров области печати принтера. Это

означает, что углы поворота должны быть выбраны таким образом, чтобы модель полностью помещалась в область печати принтера без выступающих частей за ее пределы.

Учитывая все выше описанное, можно составить следующую задачу оптимизации точности, а также времени трехмерной печати [22-23]. Пусть выбраны два критерия: $K(Rx, Ry, Rz)$ – значение соответствия напечатанного изделия его трехмерному чертежу; $T(Rx, Ry, Rz)$ – значение времени печати, где Rx, Ry, Rz – углы поворота трехмерного чертежа по осям Ox, Oy, Oz относительно платформы построения соответственно.

Тогда необходимо найти такие Rx, Ry, Rz при которых:

$$K(Rx, Ry, Rz) \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$T(Rx, Ry, Rz) = H(Rx, Ry, Rz)/d \cdot ts \rightarrow \min, \quad (2)$$

где H – высота модели, d – толщина слоя, ts – время печати одного слоя.

При этом должны быть соблюдены следующие ограничения:

$$\begin{aligned} H &< H_{pr}; \\ W &< W_{pr}; \\ L &< L_{pr}, \end{aligned} \quad (3)$$

где W, L – ширина и длина границ трехмерного цифрового чертежа в области печати, H_{pr}, W_{pr}, L_{pr} – высота ширина и длина области печати.

3. Оценка соответствия изготовленного изделия начальным характеристикам трехмерного чертежа

Для решения выше поставленной задачи в первую очередь необходимо понять, как получить численное значение критерия K [24-26]. Примем допущение, о том, что будут рассмотрены только следующие четыре класса дефектов:

- K_1 – видимость ступенек;
- K_2 – наличие сколов, пропусков печати;
- K_3 – наличие излишек материала;
- K_4 – отклонение от исходных размеров.

Тогда значение K при заданных углах R_x , R_y , R_z можно найти как единица минус сумма значений отклонений по каждому из классов дефектов, помноженных на соответствующие коэффициенты:

$$K(R_x, R_y, R_z) = 1 - (\alpha \bar{K}_1 + \beta * \bar{K}_2 + \gamma * \bar{K}_3 + \delta * \bar{K}_4); \quad (4)$$

$$\bar{K}_i = K_i \text{norm}(R_x, R_y, R_z),$$

где $i=1...4$ – номер класса, α , β , γ , δ – коэффициенты важности данного класса для лица, принимающего решение, такие что $\alpha + \beta + \gamma + \delta=1$.

Для нахождения численного значения K_{1-3} необходимо вычислить сумму отклонений показателей данного класса D_i для i элемента по его характеристикам (длина, площади сечений и другие):

$$K_{1-3}(R_x, R_y, R_z) = \sum_{i=1}^n D_i(R_x, R_y, R_z), \quad (5)$$

где n – количество найденных элементов.

Это обусловлено тем, что для одного и того же элемента трехмерного чертежа при разных размерах могут возникать конкретные дефекты или не возникать вовсе.

Для нахождения значения отклонений готового изделия от заданных размеров K_4 необходимо сопоставить исходные и реальные размеры напечатанного изделия:

$$K_4(Rx, Ry, Rz) = |C(Rx, Ry, Rz) - P|, \quad (6)$$

где C – исходные размеры трехмерного чертежа, P – реальные размеры напечатанного изделия.

4. Метод решения

Для получения численных значений всех критериев и решения поставленных задач использовался подход, основанный на изменении угла поворота модели еще до нарезания ее на слои для печати. Этот подход включает в себя следующие шаги:

1) Задать весовые коэффициенты, характеризующие важность каждого класса;

2) Найти элементы, подверженные деформации и влияющие на точность модели при печати с помощью анализа трехмерного чертежа. Задача решается методами координат или с использованием сверточных нейронных сетей [27-28].

3) Определить характеристики элементов (длина, ширина, высота, изгиб и другие) и их численное значение, а также угла между вектором, направленным вдоль этих элементов и платформой печати;

4) Вычислить значения отклонение показателей по каждому классу дефектов для найденных элементов;

5) Вычислить результирующее значение критерия К.

Для решения многокритериальной задачи было использован метод Парето. Метод Парето, также известный как метод недоминирующих решений, позволяет найти набор оптимальных решений, которые не могут быть улучшены ни по одному из критериев без ухудшения по-другому. Этот метод основывается на идее, что оптимальные решения должны достигать компромисса между различными критериями, которыми в рассматриваемой задаче выступает значение соответствия напечатанного изделия его трехмерному чертежу и значение времени печати [29-30].

5. Полученные результаты тестовых печатей

Большинство деталей схожих размеров и конкретного вида будут иметь схожие количественные показатели отклонений от исходного чертежа, поэтому необходимо провести экспериментальные тестовые печати.

Для проведения пробного эксперимента был создан трехмерный чертеж, который включает в себя следующие элементы: выпуклости, отверстия, вырезы и плоскости (рис. 3).

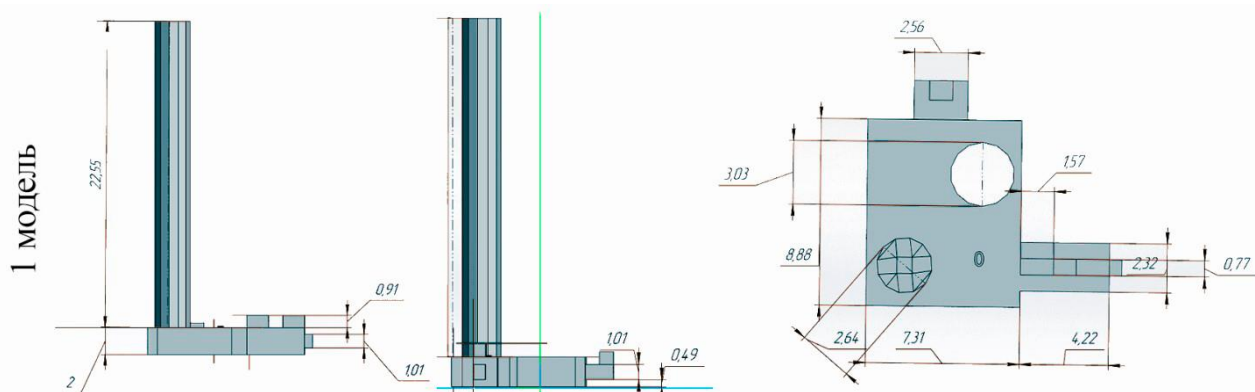


Рис. 3. Проекция трехмерного чертежа тест-модели.

Затем с помощью программы-слайсера Chitubox была выполнена расстановка в пространстве области печати нескольких копий данного чертежа с различными углами наклона к платформе построения. Расстановка поддержек выбрана автоматически через настройки слайсера, а также был произведен расчет времени печати для отдельных копий чертежа. Для каждой модели были использованы одинаковые настройки печати, включая тип материала, толщина слоя и скорость печати.

По завершению процесса печати были произведены измерения размеров изделия, произведен анализ на наличие дефектов поверхности элементов каждой модели и найдены их примерные численные значения.

В результате эксперимента было изготовлено десять тестовых изделий, при этом остальные были отбракованы в процессе отделения их от поддержек печати. Для оценки деформации каждая деталь была сфотографирована на фоне миллиметровой бумаги (Рис. 4), после чего размеры измеряемых частей были выявлены попиксельно с помощью программ компьютерной графики, а также измерительных приборов – линейки. Углы искажения были вычислены с помощью

тригонометрических уравнений и формул. Кроме того, с помощью подсветки фотокамеры отслеживался факт образования ступенек на плоских частях изделий, после чего происходили замеры отступов ступенек.

В результате измерений были составлены таблицы измерений для каждого образца печати с вычислением критерия К. Фрагмент таблицы для первого чертежа представлен в таблице 1. Были обнаружены классы дефектов К1, К2, К4 значения коэффициентов важности были выбраны следующие: $\alpha=0,3$; $\beta=0,2$; $\delta=0,5$.

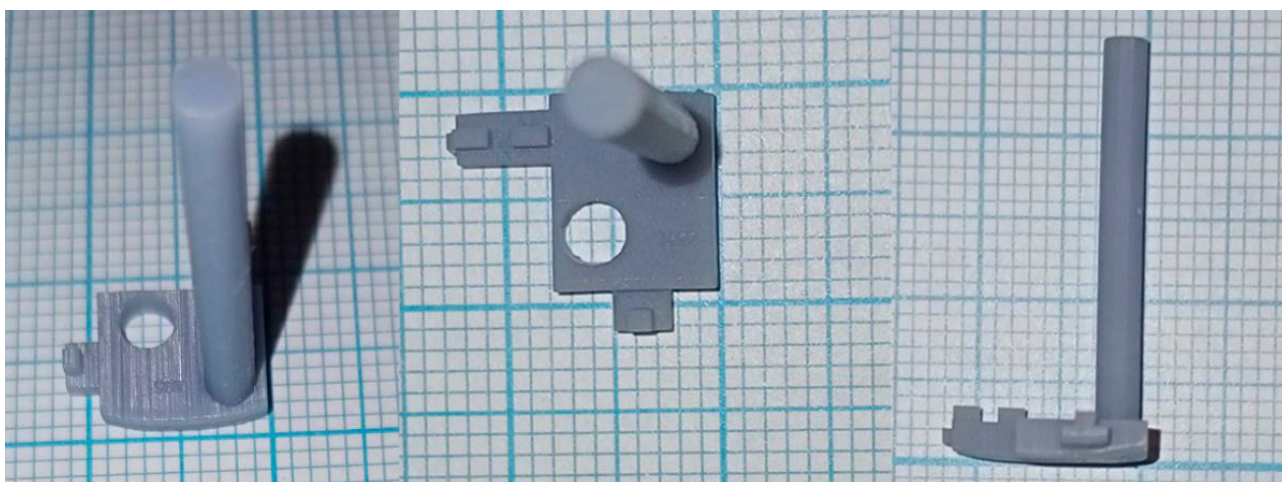


Рис. 4. Пример измерения распечатанного изделия с помощью миллиметровой бумаги и фотокамеры

Таблица 1

Фрагмент измерений первой тест модели

Характеристики	Исходные данные	Углы вращения X.Y.Z				
		90.0.0	45.0.0	22,5.0.0	0.0.0	...
Цилиндр						
Длина, мм	22,6	23	23	23	23	...
Диаметр, мм	2,6	2,7	2,5	2,7	2,7	...
Изгиб, °	0	7	4	1	3	...
Плоскость основание						
Длина, мм	8,9	9	9	9	8	...
Ширина, мм	7,3	8	7,9	7,9	8	...
Изгиб, °	0	11	2	0	0	...

Отступ ступенек, мм	0	0.2	0.1	0,2	0.2	...
Параметры печати						
Время печати, ч:м:с		0:35:09	1:13:54	1:19:34	1:15:04	...
Критерии		Вычисления				
К4		1,3	1,2	1,2	2,1	...
К1		0,2	0,1	0,2	0,2	...
К2		1,8	0,6	0,1	0,3	...
К		-0,07	0,25	0,32	-0,17	...

После вычисления всех необходимых значений для получения результирующего значения К была построена область эффективности по Парето (розовая линия), представленная на рисунке 5. Красными подписями обозначены углы поворота модели Rx, Ry. Результат из области Парето выбирается в зависимости от того, насколько важна точность или скорость печати для лица, принимающего решения.

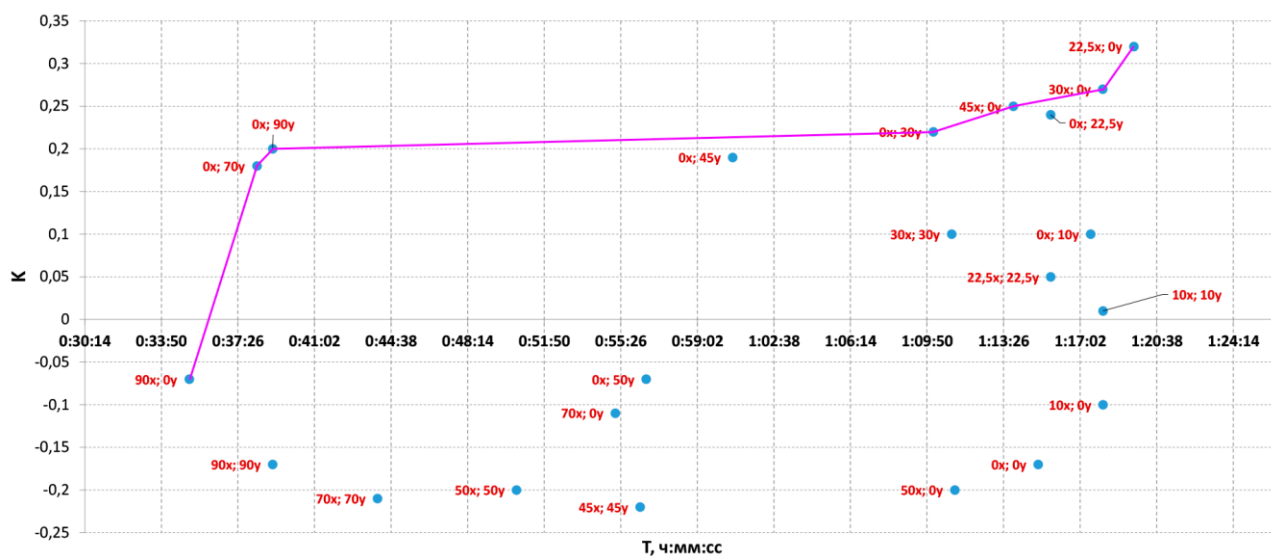


Рис. 5. Область эффективности по Парето

6. Заключение

В результате исследования был установлен факт изменения количества деформаций в зависимости от расположения элементов модели в пространстве области печати фотополимерного принтера. На данном этапе исследования нельзя однозначно ответить на вопрос, какие элементы модели более подвержены деформации при трехмерной фотополимерной печати, потому что это зависит от конкретной модели и ее особенностей. Этот вопрос требует дальнейших экспериментов для получения большего набора данных для дальнейшего анализа и потенциальной экстраполяции значений на аналогичные объекты.

В результате проведенного эксперимента было обнаружено, что мелкие детали, находящиеся на противоположной стороне от платформы печати и имеющие размер не более трех миллиметров, не подвержены искажениям. Следовательно, при выборе угла наклона эти детали не играют существенной роли, и коэффициент их важности в дальнейшем процессе будет минимальным.

Полученные результаты являются первоначальными, и их недостаточно для создания полноценной базы данных, описывающей зависимости геометрических характеристик объектов и их расположения относительно платформы печати. Однако эксперимент позволил выявить оптимальный угол наклона конкретных элементов модели, что может быть использовано в проведении дальнейших исследований и использовании полученных результатов для проектирования системы поддержки принятия решений по организации трехмерной печати. В целом, результаты эксперимента являются значительным прогрессом в оптимизации

процесса печати на фотополимерных принтерах и улучшении точности получаемых моделей.

Существующие программы-слайсеры и дополнительные программы для преобразования трехмерных чертежей не обладают полным функционалом автоматической ориентации трехмерной модели в пространстве печати, который бы учитывал предпочтения пользователя относительно устранения определенных дефектов или сокращения времени печати. Таким образом, проведенное исследование способствует улучшению прогресса в области трехмерной печати.

Для дальнейшего улучшения метода повышения точности при печати на фотополимерном принтере может стать анализ прочностных и упругих характеристик изделия, для определения критических точек или участков, которые подвержены большим нагрузкам или могут быть особенно уязвимыми к искажению и разрушениям. Используя эту информацию, можно провести оптимизацию конструкции, включая изменение геометрии, добавление поддержек или укрепление критических участков.

Список источников

1. Пиженков Е.Н., Подгорбунских В.М., Рощин В.А. Использование SLM технологий 3D печати в изготовлении деталей червячно-модульных фрез // Международная научно-практическая конференция «Современные условия взаимодействия науки и техники» (Пермь, 11 ноября 2018): сборник статей. – Уфа: Омега Сайнс, 2018. С. 91–96.

2. Молотков А.А., Третьякова О.Н. Применение машинного зрения в лазерных технологиях // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170306>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-25)
3. Wang Y.C., Chen T., Yeh Y.L. Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, vol. 105, pp. 4059-4069. DOI: [10.1007/s00170-018-1927-8](https://doi.org/10.1007/s00170-018-1927-8)
4. Karakurt I., Lin L. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing // Current Opinion in Chemical Engineering, 2020, vol. 28, pp. 134-143. DOI: [10.1016/j.coche.2020.04.001](https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001)
5. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications // Procedia Manufacturing, 2019, vol. 35, pp. 1286-1296. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.06.089](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089)
6. Казаков В.С. Фотополимерные 3D-принтеры // Научные вести. 2020. № 6 (23). С. 176-179.
7. Горячкин Б.С., Черната Н.С. Обзор возможных вариантов использования технологий и материалов 3d печати в авиационной промышленности // E-Scio. 2021. № 5 (56). С. 657-682.
8. Masiuchok O. et al. Comparative analysis of the quality of plastic products formed by DLP and FDM 3D printing technologies // Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2020. Т. 98. № 2. С. 40-48.

9. Муравский А.А., Аликин М.Б. и др. Полимерная 3D-печать: История, классификация и современные тенденции развития (обзор) // Известия СПбГИ (ТУ). 2023. № 64 (90). С. 58-66.
10. Митин В.Ю. Обзор оборудования, программного обеспечения, возможностей и этапов трехмерной печати // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2018. № 2 (41). С. 67-74.
11. Piedra-Cascón W. et al. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review // Journal of Dentistry, 2021, vol. 109, pp. 103630. DOI: [10.1016/j.jdent.2021.103630](https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103630)
12. de Castro E. F. et al. Effect of build orientation in accuracy, flexural modulus, flexural strength, and microhardness of 3D-Printed resins for provisional restorations // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2022, vol. 136, pp. 105479. DOI: [10.1016/j.jmbbm.2022.105479](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105479)
13. Kowsari K. et al. Photopolymer formulation to minimize feature size, surface roughness, and stair-stepping in digital light processing-based three-dimensional printing // Additive Manufacturing, 2018, vol. 24, pp. 627-638. DOI: [10.1016/j.addma.2018.10.037](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.037)
14. Shan Y. et al. Reducing lateral stair-stepping defects in liquid crystal display-based vat photopolymerization by defocusing the image pattern // Additive Manufacturing, 2022, vol. 52, pp. 102653. DOI: [10.1016/j.addma.2022.102653](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102653)
15. Paral S. K. et al. A Review of Critical Issues in High-Speed Vat Photopolymerization // Polymers, 2023, vol. 15, no. 12, pp. 2716. DOI: [10.3390/polym15122716](https://doi.org/10.3390/polym15122716)

16. Liu P. et al. Visualization of full-field stress evolution during 3D penetrated crack propagation through 3D printing and frozen stress techniques // Engineering Fracture Mechanics, 2020, vol. 236, pp. 107222. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2020.107222](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107222)
17. Msallem B. et al. Evaluation of the dimensional accuracy of 3D-printed anatomical mandibular models using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ printing technology // Journal of clinical medicine, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 817. DOI: [10.3390/jcm9030817](https://doi.org/10.3390/jcm9030817)
18. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
19. Богданова П.А., Сахаров Д.М., Васильева Т.В. Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений // Инновационные аспекты развития науки и техники. 2021. № 6. С. 153-157.
20. Разумов Д.Ф. Разработка методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем. ди. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Москва, МАИ, 2021, 128 с.
21. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1971. – 384 с.
22. Литовка Ю.В. Получение оптимальных проектных решений и их анализ с использованием математических моделей: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2006. – 160 с.
23. Пиявский Б.С., Абдыкеров С.Е. Методика многокритериальной оценки программ развития национального исследовательского университета // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=13446>

24. Криворученко С.А., Погосян А.М., Рябышкин А.Ю. Опыт применения оценки соответствия как средства повышения качества при создании наукоемкой продукции // Мир стандартов. 2009. № 4. С. 35-41.
25. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=109557>. DOI [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
26. Калинин С.Ю., Рождественский С.Ю., Шленов Ю.В. Оценка экономической эффективности эксплуатации ракетно-космического комплекса // Труды МАИ. 2012. № 56. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30147>
27. Вехтева Н.А., Волков А.А., Свешников А.Ю. Алгоритм оценки качества фотополимерной 3D-печати по расположению моделей в области построения // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. 2022. № 8. С. 134-138.
28. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. - 28.
29. Романова И.К. Применение аналитических методов к исследованию Парето оптимальных систем управления // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 4. С. 238-266.
30. Литовка Ю.В., Соловьев Д.С. Системы поддержки принятия решений. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2022. - 80 с.

References

1. Pizhenkov E.N., Podgorbunskikh V.M., Roshchin V.A. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye usloviya vzaimodeistviya nauki i tekhniki»*: sbornik statei. Ufa, Omega Sains, 2018, pp. 91–96.
2. Molotkov A.A., Tret'yakova O.N. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170306>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-25)
3. Wang Y.C., Chen T., Yeh Y.L. Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, pp. 4059-4069. DOI: [10.1007/s00170-018-1927-8](https://doi.org/10.1007/s00170-018-1927-8)
4. Karakurt I., Lin L. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2020, vol. 28, pp. 134-143. DOI: [10.1016/j.coche.2020.04.001](https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001)
5. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications, *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 35, pp. 1286-1296. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.06.089](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089)
6. Kazakov V.S. *Nauchnye vesti*, 2020, no. 6 (23), pp. 176-179.
7. Goryachkin B.S., Chernata N.S. Obzor vozmozhnykh variantov ispol'zovaniya tekhnologii i materialov 3d pechati v aviatsionnoi promyshlennosti, *E-Scio*, 2021, no. 5 (56), pp. 657-682.

8. Masiuchok O. et al. Comparative analysis of the quality of plastic products formed by DLP and FDM 3D printing technologies, *Visnik Ternopil's'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu*, 2020, vol. 98, no. 2, pp. 40-48.
9. Muravskii A.A., Alikin M.B. et al. *Izvestiya SPbGTI (TU)*, 2023, no. 64 (90), pp. 58-66.
10. Mitin V.Yu. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika*. 2018, no. 2 (41), pp. 67-74.
11. Piedra-Cascón W. et al. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review, *Journal of Dentistry*, 2021, vol. 109, pp. 103630. DOI: [10.1016/j.jdent.2021.103630](https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103630)
12. de Castro E. F. et al. Effect of build orientation in accuracy, flexural modulus, flexural strength, and microhardness of 3D-Printed resins for provisional restorations, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022, vol. 136, pp. 105479. DOI: [10.1016/j.jmbbm.2022.105479](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105479)
13. Kowsari K. et al. Photopolymer formulation to minimize feature size, surface roughness, and stair-stepping in digital light processing-based three-dimensional printing, *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 627-638. DOI: [10.1016/j.addma.2018.10.037](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.037)
14. Shan Y. et al. Reducing lateral stair-stepping defects in liquid crystal display-based vat photopolymerization by defocusing the image pattern, *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 52, pp. 102653. DOI: [10.1016/j.addma.2022.102653](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102653)
15. Paral S. K. et al. A Review of Critical Issues in High-Speed Vat Photopolymerization, *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 12, pp. 2716. DOI: [10.3390/polym15122716](https://doi.org/10.3390/polym15122716)

16. Liu P. et al. Visualization of full-field stress evolution during 3D penetrated crack propagation through 3D printing and frozen stress techniques, *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, vol. 236, pp. 107222. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2020.107222](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107222)
17. Msallem B. et al. Evaluation of the dimensional accuracy of 3D-printed anatomical mandibular models using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ printing technology, *Journal of clinical medicine*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 817. DOI: [10.3390/jcm9030817](https://doi.org/10.3390/jcm9030817)
18. Shtoier R. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya. Teoriya, vychisleniya i prilozheniya* (Multicriteria optimization. Theory, calculations and applications) Moscow, Radio i svyaz', 1992, 504 p.
19. Bogdanova P.A., Sakharov D.M., Vasil'eva T.V. *Innovatsionnye aspekty razvitiya nauki i tekhniki*, 2021, no. 6, pp. 153-157.
20. Razumov D.F. *Razrabotka metodiki mnogokriterial'noi otsenki proektov kosmicheskikh sredstv i sistem* (Development of a methodology for multi-criteria evaluation of spacecraft and systems projects). Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2021, 128 p.
21. Germeier Yu.B. *Vvedenie v teoriyu issledovaniya operatsii* (Introduction to Operations Research Theory), Moscow, Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1971, 384 p.
22. Litovka Yu.V. *Poluchenie optimal'nykh proektnykh reshenii i ikh analiz s ispol'zovaniem matematicheskikh modelei* (Obtaining optimal design solutions and their analysis using mathematical models), Tambov, Izd-vo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006, 160 p.

23. Piyavskii B.S., Abdykerov S.E. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=13446>
24. Krivoruchenko S.A., Pogosyan A.M., Ryabyshkin A.Yu. *Mir standartov*, 2009, no. 4, pp. 35-41.
25. Vasil'kov Yu.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109557>. DOI [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
26. Kalinin S.Yu., Rozhdestvenskii S.Yu., Shlenov Yu.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 56. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30147>
27. Vekhteva N.A., Volkov A.A., Sveshnikov A.Yu. *Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizain*, 2022, no. 8, pp. 134-138.
28. Tu Dzh., Gonsales R. *Printsipy raspoznavaniya obrazov* (Principles of pattern recognition), Moscow, Mir, 1978, 28.
29. Romanova I.K. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*, 2014, no. 4, pp. 238-266.
30. Litovka Yu.V., Solov'ev D.S. *Sistemy podderzhki prinyatiya reshenii* (Decision support systems), Tambov, Izd-vo TGTU, 2022, 80 p.

Статья поступила в редакцию 15.01.2024

Одобрена после рецензирования 01.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 15.01.2024; approved after reviewing on 01.07.2024; accepted for publication on 28.08.2024