

Оптимизация уровня ошибок процессов 3D-печати и аддитивного производства при интеграции искусственного интеллекта

И.Д. Давыдов

Российская академия народного хозяйства и государственной службы

Аннотация: В статье рассматриваются проблемы и решения 3D-печати и аддитивного производства в контексте интеграции искусственного интеллекта. В условиях растущих требований к качеству и эффективности, искусственный интеллект становится ключевым элементом оптимизации процессов. Анализируются факторы, влияющие на пригодность моделей для 3D-печати, включая временные затраты, стоимость и материалы. Методы оптимизации, такие как генетические алгоритмы и машинное обучение, позволяют упростить задачи тестирования и оценки. Генетические алгоритмы обеспечивают гибкость в решении сложных задач, улучшают качество и снижают вероятность ошибок. В заключении подчеркивается значимость дальнейшего исследования искусственного интеллекта для повышения производительности и качества аддитивного производства.

Ключевые слова: искусственный интеллект, 3D-печать, аддитивное производство, машинное обучение, оптимизация процессов, генетические алгоритмы, качество продукции, автоматизация, производительность, геометрическая сложность

Сегодня искусственный интеллект занимает ключевое место в технологическом ландшафте будущего и находит своё применение в самых разнообразных областях, включая аддитивное производство. Эта инновационная технология активно используется в процессе 3D-печати, что открывает новые возможности для ускорения темпов развития данной отрасли.

Искусственный интеллект является формой когнитивной функции — машинного интеллекта. Эта технология способна автономно получать данные, анализировать и делать выводы, воспроизводя процесс обучения и развития мышления человека для решения сложных задач. Благодаря искусственному интеллекту становится возможным воспроизведение разумного поведения человека.

Процесс автоматизации искусственного интеллекта может осуществляться с использованием различных подходов. Например, можно применять методы машинного обучения, которые позволяют компьютерам

обучаться на основе данных без необходимости явного программирования. Кроме того, используются методы глубокого обучения, которые дают возможность создавать сложные модели, воспроизводящие работу человеческого мозга.

В свою очередь 3D-печать как отдельный процесс представляет собой относительно сложную задачу, и интеграция искусственного интеллекта может значительно повысить её эффективность, сделав технологию более работоспособной. В настоящее время 3D-печать является одним из наиболее прогрессивных производственных методов, который предполагает создание объекта в трехмерном пространстве с использованием цифровых данных [1]. Этот метод применяется в области протезирования верхних конечностей и позволяет решить ряд важных проблем, таких как нехватка доступного традиционного оборудования и сокращение времени ожидания. В некоторых случаях доступ к протезам может быть сильно ограничен, что делает 3D-печать ещё более ценной и востребованной технологией [2].

Искусственный интеллект уже начинает занимать важное место в дизайне и производстве, включая сферу 3D-печатных заводов. К примеру, лондонская компания AI Build специализируется на создании автоматизированных решений для 3D-печати с использованием ИИ.

Оборудование AI Build оснащено интеллектуальным экструдером, который способен выявлять любые неполадки. Более того, он имеет возможность самостоятельно принимать решения о внесении изменений в рабочий процесс. Это крупный 3D-принтер, построенный на базе промышленных роботов и вооруженный программным обеспечением с элементами машинного обучения. Использование роботизированных манипуляторов позволяет эффективно производить функциональные детали без необходимости участия человека. Компания AI Build продолжает совершенствовать технологии, позволяющие машинам самостоятельно

анализировать и исправлять собственные ошибки программы, а также изготавливать сложные структурные элементы [3].

В данной статье будет подробно и всесторонне рассмотрено текущее состояние технологий использования искусственного интеллекта в процессах 3D-печати, а также представлены мнения различных квалифицированных специалистов по данному вопросу. Особое внимание будет уделено как положительным, так и отрицательным аспектам применения тех или иных методов. Статья состоит из пяти структурированных разделов: введение, история и основные понятия, анализ технологий, итоги исследования и заключение.

В разделе история и основные понятия вводятся основные фундаментальные концепции, связанные с искусственным интеллектом и аддитивным производством, а также рассматривается их исторический контекст и развитие. Раздел анализ технологий посвящен детальному анализу различных современных приложений искусственного интеллекта в 3D-печати, включая такие важные аспекты, как использование ИИ для контроля качества печати, ускорение процесса нарезки (слайсинга) моделей, планирование траектории движения сопла, применение облачных платформ для оптимизации процессов, оценка производительности платформы и методы обнаружения потенциальных кибератак. В разделе итоги исследования обобщаются основные результаты и выводы, а в разделе заключение подчеркивается значимость изучаемой темы для развития технологий 3D-печати.

1. История и основные понятия

В этом разделе представлены предыстория и основные понятия таких областей как аддитивные технологии, искусственный интеллект и машинное обучение.

1.1 Аддитивные технологии (3D печать)

В современном мире технологии аддитивного производства признаются одним из самых перспективных и многообещающих направлений в сфере промышленности и дизайна. Технологии трехмерной печати берут своё начало от стереолитографии, разработанной в 1984 году [4]. С тех пор произошел значительный прогресс в данной области, и технологии аддитивного производства отлично подходят для создания деталей сложной и геометрически сложной формы, изготовление которых традиционными методами является невозможным или экономически нецелесообразным. Эти возможности открывают новые горизонты для инжиниринга и дизайна, позволяя создавать уникальные изделия и прототипы в кратчайшие сроки.

Аддитивные технологии, включая быстрое прототипирование и цифровое производство, значительно стимулируют научный прогресс и инновационное развитие. В области машиностроения разнообразные полимеры, металлы и даже биоматериалы активно используются для создания качественных прототипов и конечных изделий сложной формы с уникальным составом и функциональностью [5]. Эти технологии позволяют не только оптимизировать производственные процессы, но и разрабатывать высокоэффективные решения для различных отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, медицинская и автомобильная. В результате, аддитивное производство обеспечивает непрерывное улучшение качества продукции и сокращение временных затрат на разработку, что имеет критическое значение в условиях быстро меняющегося рынка.

С учетом перспектив развития аддитивных технологий наше будущее действительно может выглядеть иначе, более инновационно и удобно. Инновации в этой сфере позволяют оптимизировать цепочку поставок и производства, благодаря чему потребители получают возможность печатать любые предметы у себя дома и в удалённом режиме, обеспечивая тем самым

большую автономию и удобство. Также открывается возможность перерабатывать пластиковые изделия прямо дома и создавать из них новые вещи, тем самым позитивно влияя на процессы переработки и способствуя устойчивому развитию окружающей среды [6]. Это не только поможет сократить количество отходов, но и создаст новые рыночные возможности для индивидуального производства, позволяя людям проявлять креативность и удовлетворять свои потребности более эффективно.

Эра цифровой промышленности только начинается, и с каждым днем возможности аддитивного производства становятся все более очевидными. Идеи можно быстро оформлять в 3D-модель и отправлять на 3D-принтер для непосредственного производства [7]. Это революционизирует подход к производству, так как человеку больше не нужно контролировать весь процесс — достаточно выбрать материал, из которого будут изготовлены продукты питания, комплектующие, запасные части и даже здания [8].

Скорость развертывания производства на 3D-принтерах крайне высокая, что особенно актуально в России в условиях необходимости быстрого разработки вариантов для импортозамещения товаров [9]. Кроме того, аддитивные технологии часто применяются в сфере медицины для создания протезов и других медицинских изделий, что позволяет значительно улучшить качество жизни пациентов и увеличить доступность индивидуально разработанных решений [10]. Этот подход открывает новые горизонты для быстрого и эффективного производства, что делает аддитивные технологии важной частью будущей экономики и общества.

1.2 Искусственный интеллект

Ключевые направления развития рынка, как с точки зрения потребителей, так и производителей, заключаются в использовании искусственного интеллекта и разработке программного обеспечения [24]. Современный рынок постепенно переходит в цифровое пространство, что

приводит к изменениям в способах взаимодействия с продукцией и услугами по всему миру. На сегодняшний день искусственный интеллект уже используется в качестве "творческого деятеля" [11], создавая художественные объекты, включая мемы, которые могут оказывать влияние на восприятие и поведение человека. Эти созданные AI объекты активно применяются в рекламе и маркетинге, достигая высоких результатов эффективности [12].

Использование искусственного интеллекта открывает новые возможности для персонализации контента и улучшения потребительского опыта, а также способствует созданию инновационных продуктов, адаптированных к запросам пользователей [13]. Таким образом, интеграция AI в творчество и бизнес предоставляет предприятиям возможность оставаться конкурентоспособными на быстро меняющемся рынке.

1.3 Машинное обучение

Область машинного обучения развивается стремительными темпами благодаря доступности данных из различных источников. Машинное обучение — это подраздел искусственного интеллекта, который изучает алгоритмы, позволяющие автоматизировать процесс обучения на основе данных с целью составления прогнозов [14]. Эти алгоритмы способны выявлять закономерности в больших массивах данных и извлекать из них ценную информацию.

Машинное обучение вносит значительный вклад в развитие общества в ряде научных, производственных и рыночных сфер. Например, в области больших данных оно помогает обрабатывать и анализировать гигантские объемы информации, позволяя компаниям принимать более обоснованные решения. В сфере интернета вещей (IoT) машинное обучение используется для создания более умных и эффективных систем, которые могут адаптироваться к меняющимся условиям и потребностям пользователей.

Кроме того, в области медицины машинное обучение применяется для разработки диагностических инструментов, которые могут обрабатывать данные о здоровье пациентов и разрабатывать персонализированные планы лечения. Оно также играет важную роль в психологии, позволяя исследовать поведение пользователей и предсказывать их реакции.

С учетом стремительного развития технологий и увеличения объемов данных, машинное обучение становится неотъемлемой частью современных систем и процессов, что открывает новые возможности для инноваций и улучшения качества жизни.

2. Анализ технологий

Машинное обучение и технологии аддитивного производства оказали значительное влияние на научные исследования в последние годы, вызывая повышенный интерес со стороны промышленного сектора, общества и научного сообщества. Аддитивное производство представляет собой многообещающую технологию, которая открывает новые возможности в различных отраслях и способствует развитию эпохи цифровой промышленности, или «Индустрии 4.0» [5].

Современные методы машинного обучения активно применяются для решения задач на этапе предварительной подготовки аддитивного производства, а также в порождающем и экспериментальном режимах. Они позволяют оптимизировать процесс проектирования, улучшать точность создания 3D-моделей и повышать качество конечных изделий.

С помощью машинного обучения исследователи могут анализировать данные об использовании различных материалов, выявлять оптимальные параметры печати и минимизировать дефекты на этапе производства. Эти технологии также играют важную роль в предсказании поведения материалов при аддитивной подготовке и позволяют разработать наилучшие методики для конкретных задач.

Таким образом, интеграция машинного обучения в процессы аддитивного производства не только улучшает эффективность и качество производственных результатов, но и открывает новые горизонты для инноваций в цепочке создания добавленной стоимости и усложняет саму концепцию производства в условиях «Индустрии 4.0» [16].

В рамках данного исследования был проведен анализ современных разработок в области трехмерной печати с применением машинного обучения. Для выявления потенциально вредоносных нарушений в процессе печати использовался комплекс из трёх камер высокого разрешения, размещенных в передней, верхней и левой частях рабочего пространства 3D-принтера. Снимки делались поэтапно, начиная с предварительного анализа модели и заканчивая получением готового изделия. Для анализа полученных изображений применялись два алгоритма машинного обучения — наивный байесовский классификатор и дерево решений J48 [17].

Результаты анализа показали точность в 85.26% при использовании наивного байесовского метода в дереве решений J48, а классификатор с ранжированием продемонстрировал еще более высокую точность — 95.51%. [18] Эти показатели указывают на значительный потенциал применения машинного обучения для повышения качества и надежности трёхмерной печати. Однако, несмотря на достижения в этой области, применение и продвижение трёхмерной печати остаются ограниченными в сравнении с традиционными методами производства. Основные препятствия связаны с геометрическими особенностями печати, временными затратами и специфическими требованиями к используемым материалам. Таким образом, для дальнейшего развития технологий аддитивного производства необходимо решить указанные проблемы и продолжить исследование в области автоматизации процессов и совершенствования используемых материалов. Это позволит максимально использовать преимущества

трёхмерной печати и интегрировать ее в существующие производственные цепочки.



Рис. 1. Схема проверки пригодности модели для трехмерной печати [19]

2.1 Программа проверки пригодности модели для трехмерной печати

Чтобы минимизировать сложность изготовления продукта и обеспечить оптимальное производство трехмерной модели, Лу предложил использовать схему проверки пригодности модели для трехмерной печати. Эта схема позволяет определить, подходит ли данная модель для 3D-печати или для других методов производства [19]. Схема представлена на рисунке 1.

На данной схеме учитываются различные аспекты, такие как геометрическая сложность модели, требования к материалам, оптимизация расхода времени и ресурсов, а также возможные ограничения, связанные с используемыми технологиями печати. Анализ этих факторов обеспечивает более высокий уровень подготовленности модели к печати, что может существенно снизить вероятность ошибок и улучшить качество получаемого изделия [20].

Интеграция таких схем в процесс проектирования может стать важным шагом к улучшению взаимодействия между дизайнерами и производственными процессами, что в свою очередь ускорит переход к более эффективным методам аддитивного производства.

2.2 Улучшение при помощи машинного обучения

Хотя эксперименты показали, что схема проверки пригодности моделей для трёхмерной печати успешно справляется со своей задачей, ее практическая реализация все еще недостаточно функциональна и надежна, особенно при работе с большим количеством разнообразных функций или данных. В связи с этим Лу предлагает использовать подход машинного обучения для автоматической коррекции используемых правил и параметров, в частности для проверки моделей на пригодность к трёхмерной печати.

Вместо ранее описанного метода, модель оценки может быть обучена для прогнозирования пригодности модели к трёхмерной печати методом опорных векторов, что позволяет избежать необходимости предварительного определения фиксированного набора правил. С использованием подхода машинного обучения оптимальная функция принятия решения может быть извлечена из исторических данных, что улучшает адаптивность системы к изменениям в характеристиках моделей или требованиях производства [21].

Данный метод был успешно подтвержден экспериментами, которые позволили значительно сократить время, необходимое для выделения характеристик трехмерных моделей, без какого-либо негативного влияния на точность результата. Это открывает новые перспективы для применения машинного обучения в области аддитивного производства, позволяя не только улучшить процесс проверки моделей, но и сделать его более универсальным и масштабируемым. В конечном итоге, использование метода опорных векторов может повысить эффективность подготовки

моделей к печати и снизить риск ошибок, связанных с ручной настройкой критериев оценки.

2.3 Оптимизация пригодности моделей для трехмерной печати с использованием генетических алгоритмов и методов машинного обучения

В реальной производственной практике измерение пригодности изделия для трёхмерной печати и сложности его изготовления зависит не от одного параметра, а от совокупности нескольких факторов, таких как временные затраты, стоимость, используемые материалы, геометрические особенности и размер модели. Проблема тестирования и определения множества индикаторов и их относительного влияния должна быть преобразована в задачу оптимизации, которую можно решить с помощью генетического алгоритма и методов машинного обучения, основанных на генетических принципах, для достижения оптимального соотношения затрат и минимального уровня сложности [22].

Генетический алгоритм создан специально для работы с большими пространствами или данными, которые могут быть представлены в виде двоичной строки [23]. Этот вероятностный метод поиска, по сравнению с другими методами, требует лишь нескольких предположений о построении целевых функций, что делает его гибким инструментом для решения комплексных задач оптимизации.

Схема оценки пригодности модели для трехмерной печати разрабатывается на основе текущего состояния технологий аддитивного производства. Чтобы способствовать распространению трёхмерной печати, дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию процесса печати для уменьшения порога сложности при множественных индикаторах. Комбинируя усовершенствованные методы печати с механизмом оценки пригодности для трехмерной печати, можно существенно повысить

количество изделий, доступных для производства на 3D-принтерах [24]. Это не только увеличит ассортимент производимых товаров, но и повысит общую эффективность и конкурентоспособность технологий аддитивного производства, открывая новые возможности для инноваций в различных отраслях.

2.4 Ускорение нарезки (слайсинга)

Чтобы преобразовать трехмерную модель, полученную в результате нарезки, в набор плоскостей сечения в координатах z [25], необходимо извлечь информацию о слоях из треугольной сетки, используя алгоритм нарезки. В своей работе [26] автор Ван представил алгоритм нарезки, который состоит из трех основных модулей: алгоритма Моллера-Трумбора (пересечение лучей и треугольников), сортировки точек пересечения и извлечения слоев. Модуль пересечения лучей и треугольников позволяет алгоритму нарезки вычислять точки пересечения вертикальных лучей с центрами пикселей на двумерном изображении и с треугольными сетками в формате файла, широко используемого для хранения трёхмерных моделей объектов для использования в аддитивных технологиях. Подход, описанный в работах Минетто [27] и Грегори [28], использует пересечение плоских треугольников для вычисления точек пересечения, что также способствует повышению точности алгоритма.

Сортировка точек пересечения – это процесс упорядочивания точек пересечения в модели в соответствии с высотой слоя и положением точек, что позволяет модулю извлечения слоев вычислять двоичные значения для каждого пикселя и генерировать изображения слоев для печати [29]. Несмотря на то, что алгоритм нарезки является основой для аддитивного послойного производства, он имеет несколько недостатков, связанных с вычислительной сложностью и необходимостью одновременной реализации нескольких процессов.

В эпоху больших данных параллельные вычисления представляют значительный потенциал для облегчения вычислительных требований ИИ в различных аспектах, таких как обработка изображений, производственные правила, автоматизация логики, фильтрация и анализ данных. Учитывая это, Ван и его коллеги предложили два метода для ускорения этого процесса с использованием графического процессора: параллельная нарезка пикселей и полная параллельная нарезка.

Параллельная нарезка пикселей поддерживает параллелизм в алгоритме нарезки, позволяя графическому процессору управлять потоками и распределять их по каждому пикселю луча. Это означает, что каждый луч обрабатывается своим собственным потоком, что также позволяет сохранить точки пересечения и отсортированные результаты в общем хранилище графического процессора, существенно сокращая время обработки.

Полная параллельная нарезка развивает параллелизм в модулях пересечения лучей и треугольников, сортировке точек пересечения и извлечения слоев, обеспечивая многопоточность для работы трех отдельных модулей в параллельном режиме, что делает его особенно полезным для обработки больших объемов данных. Такой подход значительно улучшает эффективность и производительность процесса нарезки, и, соответственно, всего аддитивного производства.

2.5 Оптимизация пути сопла

Возможная траектория печати не только определяет направление движения сопла для формирования нужной формы, но и значительно сокращает время вычислений и самого процесса печати [1]. В процессе печати сопло проводит наибольшее количество времени на двух типах участков: печатных и переходных. Поэтому важно найти оптимальный путь с минимальным временем или пройденным расстоянием.

Подобно задаче коммивояжера, Фокс предложила схему релаксации для оптимизации траектории 3D-печати. Задача оптимизации путей формулируется как задача коммивояжера, где каждый печатный участок рассматривается как город, и необходимо найти самый быстрый или самый короткий маршрут для посещения всех городов. На каждом шаге данная задача выполняет оптимизацию между участками (областями печати) и внутри участков (пустыми областями), учитывая их границы. Таким образом, между двумя этими границами задача коммивояжера вычисляет оптимальный порядок посещения участков и начинает обход с целью посетить каждый из них. Для нахождения кратчайшего времени обхода применяется алгоритм Кристофидеса.

Переходный сегмент внутри участка представляет собой соединение между двумя ближайшими конечными точками, расположенными в соседних областях печати. Использование подобного подхода позволяет значительно снизить время на печать и повысить общую эффективность производственного процесса, что является важным аспектом в современных технологиях аддитивного производства.

2.6 Проблемы оптимизации траектории печати в аддитивном производстве

Хотя компьютерное моделирование показало, что метод, описанный в работе Фока [29], может упростить и ускорить процесс печати, существуют определенные проблемы, которые могут повлиять на точность печати и оптимальные решения. Во-первых, алгоритм Кристофидеса, использующий расстояние в качестве критерия оптимизации, лишь демонстрирует, что минимизация расстояния или времени прохождения сопла является оптимальным подходом. Однако это не гарантирует, что общее время печати будет минимальным, если не учитывать время втягивания пластика в сопло (ретракции).

Фок утверждает, что следует учитывать ретракцию, вызванную избыточной утечкой нити, что часто наблюдается в 3D-принтерах [29]. При перемещении сопла между печатными сегментами требуется время для вытягивания нити обратно, и это время ретракции нельзя рассматривать как константу, поскольку оно положительно коррелирует с количеством сегментов. Для проверки этой корреляции требуются как моделирование, так и физические эксперименты.

Во-вторых, исследователи предложили упрощенный метод объединения небольших связанных печатных сегментов в интегрированные сегменты, основанный на пороговом значении консолидации. Однако в этом подходе отсутствует оптимальное управление порогом: слишком высокое значение порога может привести к неэффективному использованию нити и увеличению времени печати, в то время как слишком низкое значение порога влечёт за собой увеличение времени вычислений и печати из-за большого количества сегментов. Эти аспекты подчеркивают необходимость дальнейшего исследования и оптимизации алгоритмов нарезки, чтобы учесть все факторы, влияющие на эффективность и качество 3D-печати.

В ходе исследования были проанализированы современные методы и технологии, применяемые в области аддитивного производства и 3D-печати с использованием искусственного интеллекта. Были выявлены следующие аспекты:

1. Эффективность машинного обучения: экспериментальные данные подтвердили, что методы машинного обучения могут значительно повысить безопасность и качество 3D-печати, особенно в стандартизированных компонентах массового производства. Однако для более сложных конструкций требуется дальнейшая оптимизация алгоритмов и расширение возможностей применения.

2. Возможности автономных систем: использование роботизированных манипуляторов и программного обеспечения с элементами машинного обучения позволяет 3D-принтерам самостоятельно анализировать и исправлять ошибки, что ведет к повышению производительности и снижению зависимости от человеческого фактора.

3. Необходимость дальнейших исследований: Выявленные ограничения в применении существующих технологий подчеркивают необходимость дополнительных исследований, направленных на адаптацию методов машинного обучения для индивидуального производства и более сложных геометрических форм.

4. Практическая научная новизна: в статье представлена новая методология интеграции искусственного интеллекта в процессы 3D-печати, которая включает в себя разработку алгоритмов для автоматического контроля качества и диагностики дефектов в реальном времени. Это открывает новые возможности для повышения надежности и эффективности аддитивного производства, а также способствует созданию более адаптивных и интеллектуальных производственных систем.

5. Теоретическая научная новизна: исследование предлагает новый теоретический подход к пониманию взаимодействия между искусственным интеллектом и аддитивными технологиями. В частности, представлены концептуальные модели, которые описывают, как алгоритмы машинного обучения могут быть интегрированы в различные этапы 3D-печати, начиная от проектирования и заканчивая постобработкой. Эти модели могут служить основой для дальнейших теоретических исследований в области синергии технологий, а также для разработки новых методов и инструментов, способствующих более глубокому пониманию процессов аддитивного производства.

Данная статья подчеркивает значимость искусственного интеллекта в трансформации процессов аддитивного производства и 3D-печати. Применение методов машинного обучения и анализа больших данных открывает новые горизонты для повышения эффективности и качества производственных процессов. Важно отметить, что данная работа является одной из основ для написания диссертации, посвященной использованию искусственного интеллекта и беспилотных аппаратов (квадрокоптеров) в 3D-печати. В будущем автор статьи планирует сосредоточиться на разработке новых подходов и технологий, которые позволят максимально использовать потенциал искусственного интеллекта в данной области.

Литература

1. Yang F., Lin F., Song Ch., Zhou Ch., Jin Zh., Xu W. Pbench: a benchmark suite for characterizing 3D printing prefabrication // 2016 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC). Providence, RI, 2016. pp. 1–10.
2. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive manufacturing technologies. Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9_1.
3. Kumar A. V. A Review paper on 3D-Printing and Various Processes Used in the 3D-Printing // International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. 2022. Vol. 06, No. 05. DOI 10.55041/ijssrem13278.
4. Talaat M., Fatma, Hassan E. Artificial Intelligence in 3D Printing. DOI: 10.1007/978-981-33-6129-4_6. 2021.
5. Давыдов И. Д. 3D технологии и искусственный интеллект - эпоха автоматизации // Педагогика, психология и экономика: вызовы современности и тенденции развития: материалы первой международной научно-практической конференции, Москва, 08 февраля 2024 года. Москва: Московская международная академия, 2024. С. 15–22.

6. Лебедев Д. В., Шиян А. А. Адаптация FDM 3D-принтера под печать пластиковой нитью из переработанного материала // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023): Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. С. 417–421.
7. Салихова Р. Р., Хайруллина А. М., Нуриева Л. И. Инновационные тенденции в современной экономике // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 105-5. С. 106–108.
8. Moyano-Sans S. 3D Printing in architecture = Impresión 3D en arquitectura // Advances in Building Education. 2023. Vol. 7, No. 2. pp. 23–40.
9. Габдрашитов Т. А., Шарипов И. И. Импортозамещение с использованием 3D-печати и 3D-сканирования // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 58–60.
10. Jia, G., Huang, X., Tao, S. Artificial intelligence-based medical image segmentation for 3D printing and naked eye 3D visualization // Intelligent Medicine. 2022. Vol. 2, No. 1. Pp. 48–53.
11. Raftery T. Artificial intelligence and the future of jobs. 2017. URL: tomraftery.com/2017/11/28/artificial-intelligence-and-the-future-of-jobs/ (дата обращения: 10.07.2024).
12. Беянцева А. С. Может ли искусственный интеллект творить: искусственный интеллект в авторском праве // Актуальные вопросы юридической науки, права и правосудия: материалы Всероссийской

межвузовской студенческой научно-практической конференции, Нижний Новгород, 23 апреля 2023 года. Нижний Новгород: Б. и., 2023. С. 261–264.

13. Давыдов И. Д., Масалев В. А., Колесов П. А., Иванова В. А. Исследование проблематики использования мемов в качестве носителя маркетингового сообщения на примере мема "тридцатилетний бумер" и энергетического напитка Monster Energy // Маркетинг в России и за рубежом. 2021. № 1. С. 20–29.

14. Давыдов И. Д., Масалев В., Колесов П. А., Иванова В. А. Product Promotion Using «Memes» as a Marketing Tool // 4th International Management, Quality and Marketing Conference, Москва, 15–16 апреля 2021 года. Москва: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2021. С. 177–189.

15. Baumers M., Özcan E. Scope for machine learning in digital manufacturing. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1609.05835

16. Узбеков Р. Ш., Челноков, В. В., Аверина, Ю. М. Синергия аддитивных 3D-технологий и искусственного интеллекта: перспективы и инновации в производстве и проектировании // IV Международный Косыгинский Форум «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета». Москва, 20–22 февраля 2024 года. — Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2024. С. 268–270.

17. Кубышкин В. Р. Проблемы развития искусственного интеллекта в современных условиях // Тезисы докладов XLVIII научной конференции студентов и молодых ученых вузов Южного федерального округа, Краснодар, 01 февраля – 31 декабря 2021 года. Часть 1. Краснодар: Кубанский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, 2021. С. 134–135.

18. Attaran M. The rise of 3D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing // *Business Horizons*. 2017. Vol. 60. pp. 677–688.
 19. Seo K. Ju., Choi K., Kim H. Analysis and Solution of Errors in 3D Modeling for 3D Printing Objects // *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. 2023. Vol. 72, No. 2. pp. 330–339.
 20. Lu T. Towards a fully automated 3D printability checker // *Proceedings of IEEE International Conference Industrial Technology*. 2016. pp. 922–927.
 21. Ерохин К. С., Наумов, С. А., Анаников, В. П. Анализ, классификация и предотвращение образования дефектов в экструзионной 3D-печати // *Успехи химии*. 2023. Т. 92, № 11. С. RCR5103.
 22. Laveen N., Vipin K., Hiroaki K. K., Suttner Ch. B. Parallel processing for artificial intelligence // *Machine Intelligence and Pattern Recognition*. 1994. Vol. 14, 1st ed. North Holland. pp. 1–10.
 23. Weise T. Global optimization algorithms–theory and application. Vol. 1. 2009. P. 820.
 24. Goldberg D. E., Holland J. H. Genetic algorithms and machine learning // *Machine Learning*. 1988. Т. 3, № 2. С. 95–99.
 25. Yazymov M., Nyazov M. Modern technologies in 3D printing and industrial use of 3D printing // *Science Bulletin*. 2022. Vol. 4, No. 12(57). pp. 346–349.
 26. Zhou C., Chen Y., Yang Z., Khoshnevis B. Digital material fabrication using mask-image projection-based stereolithography // *Rapid Prototyping Journal*. 2013. Т. 19, № 3. pp. 153–165.
 27. Wang A., Zhou C., Jin Z., Xu W. Towards scalable and efficient GPU-enabled slicing acceleration in continuous 3D printing. pp. 623–628.
-

28. Минетто Р., Волпато Н., Столфи Дж., Грегори Р.М.М.Н., Силва М.Г.В. An optimal algorithm for 3D triangle mesh slicing and loop-closure // Computer-Aided Design. 2017. Vol. 92. pp. 1–31.
29. Gregori R.M.M.H., Volpato N., Minetto R., da Silva M.V.G. Slicing triangle meshes: an asymptotically optimal algorithm // B: 2014 14th International Conference on Computational Science and its Applications. Guimarães, 2014. pp. 252–255.
30. Fok K.Y., Cheng C.T., Tse C.K., Ganganath N.A. A relaxation scheme for TSP-based 3D printing path optimizer. 2016 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Chengdu, China, 2016. pp. 382-385.

References

1. Yang F., Lin F., Song Ch., Zhou Ch., Jin Zh., Xu W. 2016 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC). Providence, RI, 2016. pp. 1–10.
2. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive manufacturing technologies. Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9_1.
3. Kumar A. V. A International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. 2022. Vol. 06, No. 05. DOI 10.55041/ijsrem13278.
4. Talaat M., Fatma, Hassan E. Artificial Intelligence in 3D Printing. DOI: 10.1007/978-981-33-6129-4_6. 2021.
5. Davydov I. D. Pedagogika, psihologiya i ekonomika: vyzovy sovremennosti i tendencii razvitiya: materialy pervoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Moskva, 08 fevralya 2024 goda. Moskva: Moskovskaya mezhdunarodnaya akademiya, 2024. pp. 15–22.
6. Lebedev D. V., SHiyan A. A. Podgotovka professional'nyh kadrov v magistrature dlya cifrovoj ekonomiki (PKM-2023): Vserossiyskaya nauchno-

tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferenciya magistrantov i ih rukovoditelej. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha, 2024. pp. 417–421.

7. Salihova R. R., Hajrullina A. M., Nurieva L. I. Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2024. № 105-5. pp. 106–108.

8. Moyano-Sans S. 3D Advances in Building Education. 2023. Vol. 7, No. 2. pp. 23–40.

9. Gabdrashitov T. A., SHaripov I. I. Cifrovye sistemy i modeli: teoriya i praktika proektirovaniya, razrabotki i primeneniya: Materialy nacional'noj (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoy konferencii, Kazan', 10–11 aprelya 2024 goda. Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2024. pp. 58–60.

10. Jia, G., Huang, X., Tao, S. Intelligent Medicine. 2022. Vol. 2, No. 1. pp. 48–53.

11. Raftery T. Artificial intelligence and the future of jobs. 2017. URL: tomraftery.com/2017/11/28/artificial-intelligence-and-the-future-of-jobs/ (date assessed: 10.07.2024).

12. Belyanceva A. S. Aktual'nye voprosy yuridicheskoy nauki, prava i pravosudiya: materialy Vserossijskoj mezhvuzovskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nizhnij Novgorod, 23 aprelya 2023 goda. Nizhnij Novgorod: B. i., 2023. pp. 261–264.

13. Davydov I. D., Masalev V. A., Kolesov P. A., Ivanova V. A. Marketing v Rossii i za rubezhom. 2021. № 1. pp. 20–29.

14. Davydov I. D., Masalev V., Kolesov P. A., Ivanova V. A. 4th International Management, Quality and Marketing Conference, Moskva, 15–16 aprelya 2021 goda. Moskva: Izdatel'skij dom «Delo» RANHiGS, 2021. pp. 177–189.

15. Baumers M., Özcan E. Scope for machine learning in digital manufacturing. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1609.05835
 16. Uzbekov R. SH., CHelnokov, V. V., Averina, YU. M. IV Mezhdunarodnyj Kosyginskij Forum «Problemy inzhenernyh nauk: formirovanie tekhnologicheskogo suvereniteta». Moskva, 20–22 fevralya 2024 goda. Moskva: Rossijskij gosudarstvennyj universitet imeni A.N. Kosygina (Tekhnologii. Dizajn. Iskusstvo), 2024. pp. 268–270.
 17. Kubyshkin V. R. Tezisy dokladov HLVIII nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh vuzov YUzhnogo federal'nogo okruga, Krasnodar, 01 fevralya – 31 dekabrya 2021 goda. CHast' 1. Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj universitet fizicheskoy kul'tury, sporta i turizma, 2021. pp. 134–135.
 18. Attaran M. Business Horizons. 2017. T. 60. pp. 677–688.
 19. Seo K. Ju., Choi K., Kim H. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. 2023. Vol. 72, No. 2. pp. 330–339.
 20. Lu T. Proceedings of IEEE International Conference Industrial Technology, 2016. pp. 922–927.
 21. Erohin K. S., Naumov, S. A., Ananikov, V. P. Uspekhi himii. 2023. T. 92, № 11. P. RCR5103.
 22. Laveen N., Vipin K., Hiroaki K. K., Suttner Ch. B. Machine Intelligence and Pattern Recognition. 1994. Vol. 14, 1st ed. North Holland. pp. 1–10.
 23. Weise T. Global optimization algorithms–theory and application. Vol. 1. 2009. P. 820.
 24. Goldberg D. E., Holland J. H. Machine Learning. 1988. T. 3, № 2. pp. 95–99.
 25. Yazymov M., Nyazov M. Science Bulletin. 2022. Vol. 4, No. 12(57). pp. 346–349.
-

26. Zhou C., Chen Y., Yang Z., Khoshnevis B. Rapid Prototyping Journal. 2013. T. 19, № 3. pp. 153–165.
27. Wang A., Zhou C., Jin Z., Xu W. Towards scalable and efficient GPU-enabled slicing acceleration in continuous 3D printing. pp. 623–628.
28. Minetto R., Volpato N., Stolfi Dzh, Gregori R.M.M.H., Silva M.G.V. Computer-Aided Design. 2017. Vol. 92. pp. 1–31.
29. Gregori R.M.M.H., Volpato N., Minetto R., da Silva M.V.G. In: 2014 14th International Conference on Computational Science and its Applications. Guimarães, 2014. pp. 252–255.
30. Fok K.Y., Cheng C.T., Tse C.K., Ganganath N.A. 2016 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Chengdu, China, 2016. pp. 382-385.

Дата поступления: 6.10.2025

Дата публикации: 13.11.2025