

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 3D-ПЕЧАТЬЮ

FUNCTIONAL MODELING OF AN INTELLIGENT 3D PRINTING CONTROL SYSTEM

**K. Karmitsky
A. Kuznetsov**

Summary. This research article examines in detail the key issues related to the development of a formalized description of the development and operation of an automated information system for managing industrial 3D printing processes. The article, using a systems approach and structural analysis, discusses the creation of functional models of information processes for an automated information system for managing industrial 3D printing processes. A systems analysis of the industrial 3D printing process chain was performed. This system analysis examined in detail the organization and management features of industrial 3D printing processes. A set of information models detailing industrial 3D printing processes was constructed in the form of structured diagrams created using the IDEF0 functional modeling methodology: a generalized functional-technological scheme and decomposition diagrams detailing functional subprocesses. The paper examines the methodological foundations of the systems approach and proposes various models of the processes involved, describes the functional architecture of the system, and evaluates the prospects for using the proposed approach. The proposed information support for industrial 3D printing management processes serves as a model for information support of management decision-making.

Keywords: functional approach, information modeling, systems approach, development processes, industrial 3D printing, control processes, automated control system, information models.

Кармицкий Кирилл Сергеевич
Аспирант, Российский государственный
социальный университет, г. Москва
kiruha76@gmail.com

Кузнецов Андрей Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент, Российский
государственный социальный университет, г. Москва
askgoogle@internet.ru

Аннотация. В данной научной статье подробно рассмотрены основные вопросы, касающиеся разработки формализованного описания процессов разработки и функционирования автоматизированной информационной системы управления процессами промышленной трехмерной печати. В статье с позиций системного подхода и структурного анализа обсуждаются вопросы создания функциональных моделей информационных процессов автоматизированной информационной системы управления процессами промышленной 3d-печати. Выполнен системный анализ цепочки процессов промышленной 3d-печати. В процессе системных исследований подробно рассмотрены особенности организации и управления процессами промышленной 3d-печати. Построен набор информационных моделей детализации процессов промышленной трехмерной печати в виде структурированных диаграмм, выполненных по методологии функционального моделирования IDEF0: обобщенная функционально-технологическая схема и диаграммы декомпозиции, детализирующие функциональные подпроцессы. В работе рассмотрены методологические основы системного подхода и предлагаются различные модели протекающих процессов, описывается функциональная архитектура системы, и оцениваются перспективы использования предложенного подхода. Предложенное информационное обеспечение процессов управления промышленной 3d-печатью выступает в качестве модели информационной поддержки процесса принятия управленческих решений.

Ключевые слова: функциональный подход, информационное моделирование, системный подход, процессы разработки, промышленная 3d-печать, процессы управления, автоматизированная система управления, информационные модели.

Введение

Современные системы автоматизированного управления не предоставляют полноценно адаптированных решений для управления предприятиями в области аддитивного производства. В частности — 3D-печати. Из-за большого разнообразия оборудования, 3D-моделей и требований к техническому заданию финального изделия, применять одни и те же процессы становится проблематично, что требует большего количества времени участия оператора. Параметры для

печати, материал, и оборудование сильно варьируются от эксплуатационных условий изделия, что также приводит к увеличению затрат на сотрудников.

Традиционные автоматизированные системы управления имеют жесткие алгоритмы работы, адаптированные к классическому производству, и не позволяют полноценно развернуть АСУ на предприятии.

Современные системы управления 3D-печатью постоянно усложняются за счет внедрения дополнитель-

ных многофункциональных модулей, анализа, поиска отклонений, выявления ошибок подачи материала. Ключевым объектом исследования в такой системе становятся не алгоритмы, а совокупность функций, которые преобразовывают входные данные в контролируемый технологический процесс. Именно функциональная структура определяет какие данные будут проанализированы, какие решения будут приняты и в какие моменты работы необходимо внести изменения, а также какие ограничения обеспечивают стабильность и качество.

Цель: Произвести функциональное моделирование интеллектуальной информационной системы управления 3D-печатью, а также формализовать ряд процессов.

В статье рассматриваются основные функциональные требования к интеллектуальной информационной системе управления 3D-печатью, а также построены схемы ряда процессов с использованием IDEF0.

Интеллектуальная система управления 3D печатью. Функции и назначение

Интеллектуальная система управления — это комплекс программно-аппаратных решений управления предприятиями с использованием различных подходов искусственного интеллекта. В настоящее время данные системы начинают пользоваться все большей и большей популярностью ввиду того, что они способны решать большой спектр задач нежели классические автоматизированные системы управления.

В направлении 3D-печати начинают появляться системы, позволяющие контролировать все больше и больше процессов и начинают внедряться интеллектуальные вспомогательные системы: машинное зрение для анализа дефектов отклонения во время печати, модули Lidar, сканирующие поверхность платформы для оптимизации качества первого слоя, системы калибровки потока подачи филамента и другие. Однако данных вспомогательных модулей недостаточно для решения полного спектра задач, возникающих во время управления 3D-печатью.

Данные системы используются для мониторинга процесса печати крупных предприятий, где возникающие проблемы затруднительно своевременно обнаружить. Использование таких систем позволяет сократить финансовые затраты на ремонт оборудования, предотвратить дальнейшую порчу оборудования. Пример таких систем: Obico, OctoEveryWhere. Однако данные системы являются модульными и не способны контролировать необходимые процессы до этапа отправки трехмерной модели на печать.

ИИСУ предполагает следующий функционал:

- Анализ первичных данных
- Использование информационных систем
- Принятие и корректировка решений в условиях неопределенности.

Функциональная модель интеллектуальной информационной системы управления 3D печатью с использованием IDEF0

В данной главе описаны и рассмотрены основные функции системы, а также построены контекстные диаграммы ряда процессов, декомпозицией основных функций.

A-0 Интеллектуальная система управления 3D-печатью

Основным назначением системы является сокращение времени присутствия оператора и других управляющих процессами единиц на предприятии. Система анализирует входящие данные и предлагает вариант решений в соответствии с заданными критериями и требованиями к финальному объекту.

Входы:

- Техническое задание на изготовление изделия.
- 3D-модель изделия
- Информация о предыдущих работах
- Общие требования к качеству и срокам изделия.

Управление:

- Стандарты ГОСТ и технологические карты производства.
- Производственные риски предприятия.
- Контроль качества на предприятии.
- Ключевые параметры ИИ моделей.

Механизмы:

- Оборудование и средства наблюдения за 3D-печатью
- Вычислительное оборудование
- Интеллектуальные системы прогнозирования, анализа, оптимизации и диагностики
- Человеческий персонал

Выходы:

- Готовое изделие
- Отчеты о выполненном задании
- Обновление моделей

Контекстная диаграмма декомпозиции функций интеллектуальной системы управления IDEF0 A0 (рис. 1).

Разработана функциональная модель интеллектуальной системы управления 3D-печатью. На контекстной диаграмме отражены основные входы, механизмы, выходы и управляющие воздействия.

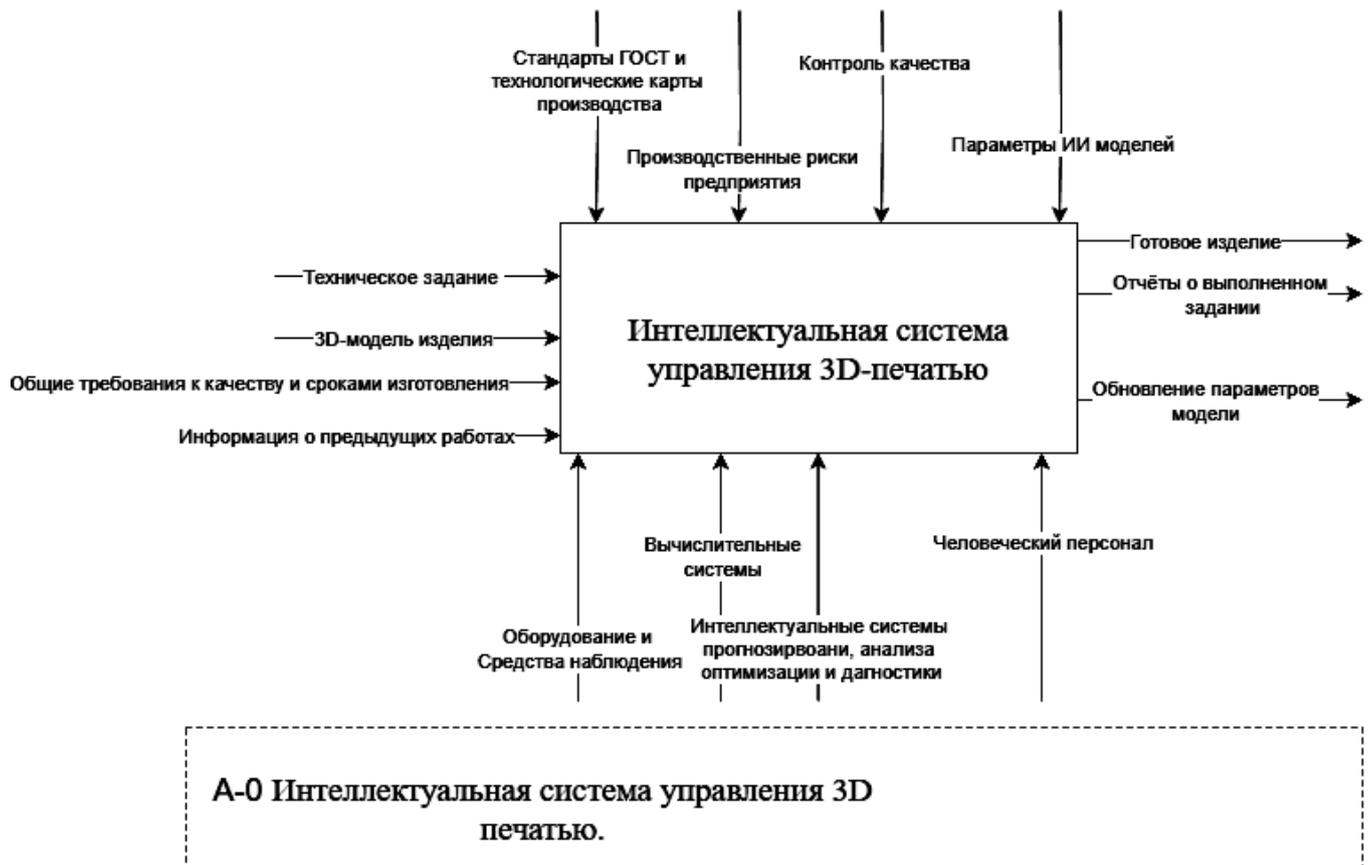


Рис. 1. IDEF0-диаграмма верхнего уровня процесса управления 3D-печатью

Детализация подпроцессов.

Диаграмма A0 «Интеллектуальная система управления 3D печатью» была разделена на несколько основных подпроцессов:

- A1 — Формализация требований и анализ 3D-модели изделия.
- A2 — Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати.
- A3 — Мониторинг и адаптивное управление процессом 3D-печати.
- A4 — Анализ результатов и самообучение системы.

A2 — Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати

В рамках заданной темы работы будет рассмотрена и детализирована данная подфункция.

Основная задача данной подфункции оптимизировать работу оператора в выборе правильной технологии производства, оборудовании, параметров для печати.

Детализировать ее можно следующим образом:

A2.1 — Выбор технологии, оборудования и материалов

На вход в данной подпроцесс из A1 поступают формализованные требования к итоговому изделию, содержащие информацию о точности, шероховатости, механическим свойствам и размеры требуемого изделия. Также из подпроцесса A1 поступает информация о типе и классе изделия — к какой категории относится требуемое изделие и перечень допустимых материалов.

Управляющими воздействиями в данном процессе выступают справочники доступных технологий и характеристик, в которых содержится информация о поддерживаемых материалах и технологий, фактическая точность получаемых изделий, а также прочностные характеристики в соответствии с выбранной технологией. База данных оборудования, в которой хранится информация о доступных принтерах, их точность, мощность и фактические состояние. Правила выбора технологии и оборудования — В зависимости от требуемой прочности, материала и размеров изделия выбирается та или иная технология печати. И политика предприятия, где содержится перечень запрещенного оборудования, нежелательные материалы для печати.

Механизмами выступает модуль выбора технологии, база данных с описанием оборудования и технологий, и технолог, необходимый на данной стадии.

На выход отправляется информация о выбранной технологии производства, список подходящего оборудования с сортировкой по приоритетам, а также обоснование выбора той или иной технологии.

A2.2 Определение ориентации и положения объекта

Данный подпроцесс определяет оптимальную ориентацию трехмерной модели в рабочей зоне оборудования, а также оптимальное расположение поддерживающих структур.

На вход в данный подпроцесс поступает 3D модель из A1, информация от технологических признаков изделия — толщина стенок объекта, нависающие элементы, полости. А также выбранная технология и список оборудования из A 2.1.

Управляющими воздействиями выступают геометрические ограничения оборудования — размеры рабочего поля и возможности печати без поддержек при определенных условиях. Правила формирования поддержек — максимально допустимый угол нависаний и другие параметры поддержек. Критерии для ориентации модели на платформе — минимизация количества поддержек, минимизация деформаций. А также минимизация времени печати.

Механизмами выступает модули анализа геометрии, модель генерации поддержек, модуль оптимизации ориентации (алгоритмы оптимизации поддержек).

На выход поступает набор оптимальных вариантов ориентации объекта в пространстве, где для каждого варианта предоставляется модель, расположенная на платформе.

A2.3 Подбор параметров изделия

Основной задачей является подбор основных параметров печати на основании полученных данных из A 2.2, которые будут наиболее оптимальными в рамках заданной задачи.

Входами выступают различные сведения об изделии из A1, выбранная технология и оборудование и A 2.1

Управляющим воздействием выступают технологические регламенты, типовые режимы, политика безопасности, и модели зависимостей.

Механизмы в данном подпроцессе выступают модуль выбора оптимального режима, база данных техно-

логических регламентов, ML-модель, подсказывающая оптимальный режим печати, а также технолог, который может понадобиться для решения сложных ситуаций.

На выход поступает для каждого варианта ориентации определенный набор параметров для печати, такие как, толщина слоя, скорость печати, оптимальный угол нависания поддержек, а также допустимый диапазон параметров

A2.4 Оценка вариантов производства по критериям качества, времени и затрат

Основным назначением подпроцесса является вычисление прогнозируемых значений, на основе данных предыдущих процессов, такие как риск дефектов при печати, время изготовления, расход материалов, стоимость.

На вход в данный подпроцесс поступает информация из блока A 2.2, параметры для печати из A 2.3, а также информация о предыдущих задачах, для анализа данных и выявления риска брака.

В качестве управляющих воздействий здесь выступают модели качества и дефектов (физические, эмпирические и обученные ML-модели), модели расчета времени и ресурсов (расход материала и времени печати), а также критерии (недопустимые значения времени производства, нормирование показателей).

Механизмами выступают — модуль прогнозирования качества, риска и дефектов. Модуль расчета, модуль агрегации результатов, а также вычислительная платформа.

На выход выдается вероятность дефектов, интегральная оценка качества, расчетное время печати, ожидаемый расход материала, его себестоимость и стоимость производства.

A2.5 Оптимизация и формирование плана производства и управляющей программы

Основной задачей данного подпроцесса является многокритериальная оптимизация данных, полученных из предыдущих подпроцессов с целью выбора оптимального варианта из предложенных и создание управляющего G-Code файла.

Входами в данном подпроцессе выступают варианты из подпроцесса A 2.4, содержащие информацию о стоимости, времени, расходе материала, а также информация о состоянии оборудования, их загрузке.

Управляющими воздействиями выступают критерии, приоритеты и методы оптимизации, а также различные

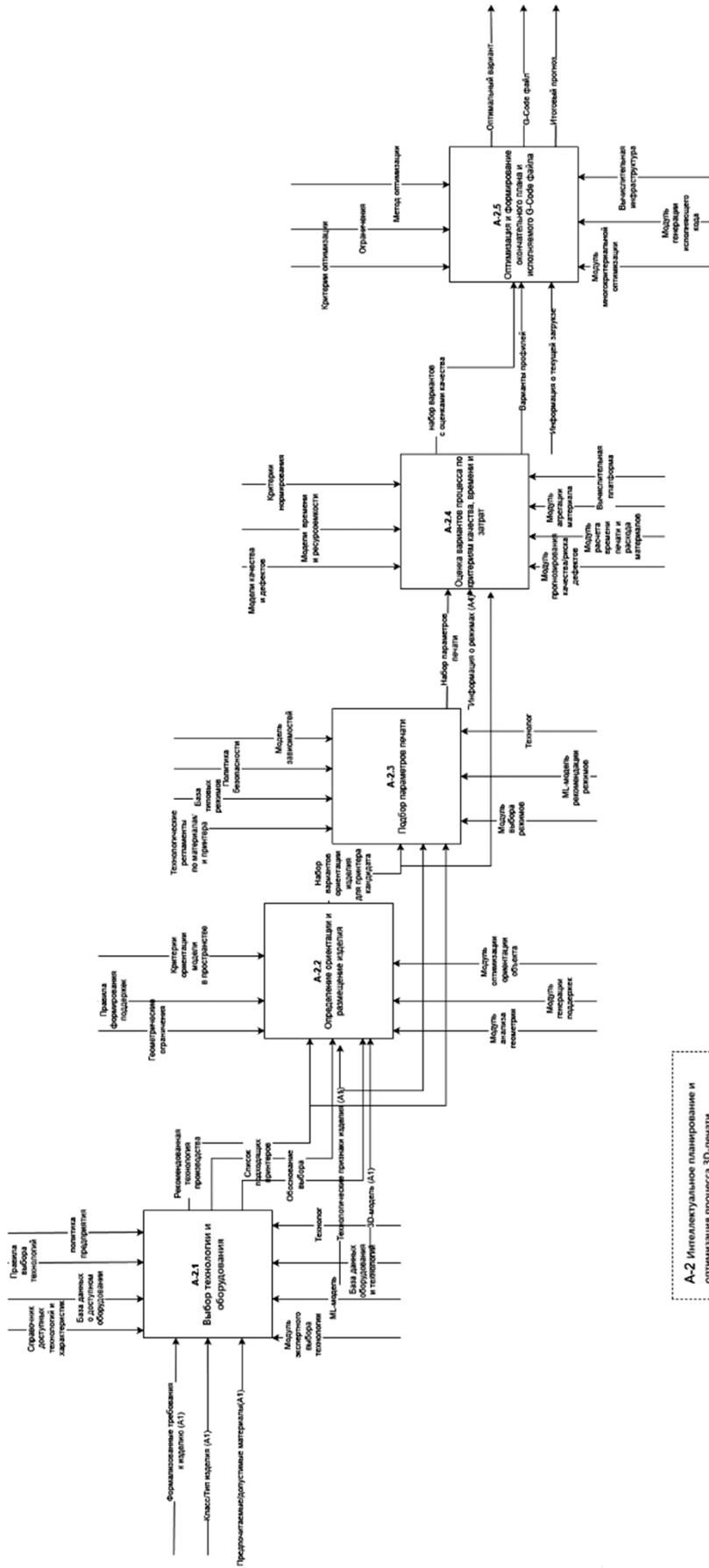


Рис. 3. Диаграмма уровня А2. Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати

A-2 Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати

ограничения (время изготовления, стоимость, вероятность брака).

Механизмами выступают модуль многокритериальной оптимизации — реализация принятия решений, модуль генерации исполняемых файлов (слайсеры), а также вычислительная инфраструктура.

Выходами в данном подпроцессе это выбранный оптимальный вариант учитывая выбранную технологию, ориентацию объекта в пространстве, и наборы параметров печати. Управляющий G-Code файл, и итоговые показатели — время, расход материала, стоимость, себестоимость, прогнозируемое качество.

Заключение

В данной работе была разработана функциональная модель интеллектуальной системы управления 3D-печатью с использованием методологии IDEF0. Были определены основные функции системы, а также построена схема А0 «Интеллектуальная система управления 3D-печатью», определены основные входы и выходы системы, ее функции и механизмы.

Уровень А0 был разделен на несколько ключевых подуровней:

- А1 — Формализация требований и анализ 3D-модели изделия.
- А2 — Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати.
- А3 — Мониторинг и адаптивное управление процессом 3D-печати.
- А4 — Анализ результатов и самообучение системы.

Уровень А2 Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати был разделен на пять подпроцессов:

- А-2.1 Выбор технологии и оборудования
- А-2.2 Определение ориентации и размещение изделия
- А-2.3 Подбор параметров печати
- А-2.4 Оценка вариантов процесса по критериям качества, времени и затрат
- А-2.5 Оптимизация и формирование окончательного плана и исполняемого G-Code файла.

Каждый подпроцесс был описан, а также построена схема декомпозиции А 2.1–2.5.

Предложенная функциональная модель позволяет понять основные функции информационной системы. Также намечены направления для дальнейших исследований и декомпозиции оставшихся процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловцева Н.В., Крылов Е.Г. IDEF-моделирование компонентов автоматизированных производственных систем // Перспективы развития информационных технологий. 2014. №21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/idef-modelirovanie-komponentov-avtomatizirovannyh-proizvodstvennyh-sistem>
2. Лисяк Владимир Васильевич Обзор слайсеров для 3d-печати // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. №3 (227). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-slayerov-dlya-3d-pechati>
3. Козловцева Н.В., Крылов Е.Г. IDEF-моделирование компонентов автоматизированных производственных систем // Перспективы развития информационных технологий. 2014. №21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/idef-modelirovanie-komponentov-avtomatizirovannyh-proizvodstvennyh-sistem>
4. Переяшкин Алексей Владиславович Проектирование информационной системы управления // Вестник науки и творчества. 2017. №3 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-informatsionnoy-sistemy-upravleniya>
5. Смирнов Н.Н., Кузнецов А.С. Формализация процессов обработки данных устройств интернета вещей в информационных системах мониторинга на основе структурного системного анализа // МНИЖ. 2024. №7 (145). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-protseessov-obrabotki-dannyh-ustroystv-interneta-veschey-v-informatsionnyh-sistemah-monitoringa-na-osnove>
6. Стенько Дмитрий Владимирович, Хапов Артем Анатольевич, Капанова Анна Борисовна, Бадаева Наталья Валентиновна, Новиков Евгений Рюрикович Исследование анизотропных свойств полимерных изделий при реализации FDM-технологии // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-anizotropnyh-svoystv-polimernyh-izdeliy-pri-realizatsii-fdm-tehnologii>
7. Савостин Дмитрий Александрович, Кириченко Евгений Олегович, Шаранов Александр Олегович Будущие перспективы автоматизированного проектирования (сапр) с точки зрения искусственного интеллекта и 3D-печати // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/buduschie-perspektivy-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-sapr-s-tochki-zreniya-iskusstvennogo-intellekta-i-3d-pechati>
8. Чабаненко Александр Валерьевич Обеспечение качества аддитивного производства посредством моделирования процессов печати // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-kachestva-additivnogo-proizvodstva-posredstvom-modelirovaniya-protseessov-pechati>
9. Карелина Мария Юрьевна, Филатов Владимир Викторович, Нефёлов Илья Сергеевич, Талдыкин Дмитрий Сергеевич Исследование отклонений действительной геометрии деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, от номинальной геометрии их цифровых двойников // Т-Comm. 2025. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-otkloneniy-deystvitelnoy-geometrii-detaley-izgotovlennyh-po-tehnologii-3d-pechati-ot-nominalnoy-geometrii-ih-tsifrovyyh>
10. Андрюшкин А.Ю., Буцикин Е.Б., Ли Чжэньнин Влияние скорости 3d-печати аддитивной установки по FDM-технологии на точность изделия // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-skorosti-3d-pechati-additivnoy-ustanovki-po-fdm-tehnologii-na-tochnost-izdeliya>
11. Касимов Руслан Михайлович Определение параметров FDM-принтера с учётом геометрических размеров моделей // Наука без границ. 2021. №5 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-fdm-printera-s-uchyotom-geometricheskikh-razmerov-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).