

*Научная статья*

УДК 004.81

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Любовь Нефёдова\* 

Научно-исследовательский институт прикладного материаловедения Концерна ВКО «Алмаз – Антей», Санкт-Петербург, Российская Федерация, nefedova@goz.ru

\*Автор, ответственный за переписку: nefedova@goz.ru

### Аннотация

В статье рассматривается концепция цифровой нити аддитивного производства как основа для повышения экономической эффективности производственного цикла за счет интеллектуальной поддержки этапа проектирования. Предлагаются математическая модель и алгоритмическая процедура этапа «Поиск и подбор фрагментов знаний» в рамках авторского развития модели адаптивного управления МАРЕ-К за счет включения этапов поиска, повторного использования и оценки. Показано, что наиболее существенный потенциал повышения производительности аддитивного производства сосредоточен на стадии проектирования цифровых моделей изделий и технологических процессов, где применение методов онтологического моделирования и машинного обучения позволяет существенно сократить трудоемкость и повысить качество принимаемых решений. В работе формализована задача поиска и подбора фрагментов знаний на основе сочетания семантических и эмбединговых представлений, предложена многоэтапная процедура отбора кандидатов, включающая фильтрацию по атрибутам, эмбединговый поиск, переупорядочивание, проверку ограничений и отбор по критерию разнообразия. Такой подход позволяет сочетать интерпретируемость онтологий с масштабируемостью и устойчивостью ANN-механизмов. Результатами работы являются модель цифровой нити аддитивного производства, подробное описание и система математического обеспечения этапа поиска и подбора фрагментов. Полученные результаты формируют основу для построения цифровой нити аддитивного производства, ориентированной на самообучающуюся базу знаний и непрерывное улучшение моделей.

**Ключевые слова:** цифровая нить, аддитивное производство, поддержка принятия решений, машинное обучение, экономическая эффективность.

**Цитирование:** Нефёдова, Л., 2025. Математическое обеспечение адаптивного проектирования в аддитивном производстве. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Нефёдова Л., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*Research article*

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

## MATHEMATICAL MODELS FOR ADAPTIVE DESIGN IN ADDITIVE MANUFACTURING

Lyubov Nefedova\* 

Research Institute of Applied Materials Science, Almaz-Antey Concern, St. Petersburg, Russia,  
nefedova@goz.ru

\*Corresponding author: nefedova@goz.ru

### Abstract

The article examines the concept of the digital thread in additive manufacturing as a foundation for improving the economic efficiency of the production cycle through intelligent support at the design stage. A mathematical model and algorithmic procedure for the "Search and Selection of Knowledge Fragments" stage are proposed within the framework of the authors' development of the MAPE-K adaptive control model by incorporating the stages of search, reuse, and evaluation. It is shown that the most significant potential for increasing the productivity of additive manufacturing is concentrated at the design stage of digital product models and technological processes, where the application of ontological modeling and machine learning methods can significantly reduce labor intensity and improve the quality of decisions made. The study formalizes the task of searching and selecting knowledge fragments based on a combination of semantic and embedding representations. A multi-stage candidate selection procedure is proposed, including attribute filtering, embedding search, re-ranking, constraint validation, and selection based on diversity criteria. This approach allows combining the interpretability of ontologies with the scalability and robustness of ANN mechanisms. The results of the work include a model of the digital thread for additive manufacturing, a detailed description, and a system of mathematical support for the stage of searching and selecting fragments. The obtained results form the basis for building a digital thread for additive manufacturing, oriented towards a self-learning knowledge base and continuous model improvement.

**Keywords:** digital thread, additive manufacturing, decision support, machine learning, economic efficiency.

**Citation:** Nefedova, L., 2025. Mathematical models for adaptive design in additive manufacturing. Sustainable Development and Engineering Economics 4, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Nefedova L., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

## 1. Введение

Аддитивное производство (АП) обеспечивает принципиально новые возможности по сравнению с традиционными методами производства: благодаря послойному построению изделий оно позволяет реализовывать сложнейшие геометрии, создавать иерархические структуры и расширять функциональность деталей (Trovato et al., 2025). Однако такая свобода «трехмерной» печати требует качественно иных подходов к проектированию, что накладывает дополнительную трудоемкость на ранние стадии разработки (Trovato et al., 2025; Dinar & Rosen, 2017). В частности, в АП «проектирование» превращается в критический узел: отсутствие формальных руководств и накопленной базы знаний приводит к длительному «ручному» конструированию решений для новых изделий (Dinar & Rosen, 2017).

АП характерно высокой вариативностью материалов, технологических режимов и дизайнов (Design for Additive Manufacturing, DfAM), что делает повторное использование правил и параметров особенно важным. В этих условиях концепция цифровой нити – бесшовной интеграции данных и знаний по всему жизненному циклу продукта – приобретает особую важность. Цифровая нить объединяет информацию от этапа эскизного и детального проектирования через производство, эксплуатацию и утилизацию изделия (Abdel-Aty & Negri, 2024), устраняя информационные «силосы» внутри предприятия. Цифровая нить позволяет хранить, версионировать и автоматически извлекать проверенные фрагменты технологических цепочек и параметров, что в итоге сокращает время проектирования и число дорогостоящих итераций при выводе изделий в серию. Это дает предпосылки для автоматизации и ускорения проектирования, поскольку позволяет обращаться к накопленным данным и готовым решениям.

В исследовании ставится гипотеза о том, что организация цифровой нити, основанная на динамически обновляемой онтологии знаний АП и соответствующем математическом аппарате поиска, может существенно сократить трудоемкость этапа проектирования. Целью статьи является разработка системы математического обеспечения этапа проектирования в АП. Задачи статьи, позволяющие достичь поставленную цель, формулируются следующим образом: предложить модель цифровой нити АП, показывающую место этапа проектирования в жизненном цикле управления АП; предложить систему математического обеспечения этапа проектирования, позволяющую эффективно повторно использовать накопленные знания.

## 2. Обзор литературы

Из анализа обзоров и статей по вопросам актуальных тенденций в области автоматизации АП видно несколько устойчивых трендов:

- Интеграция цифровых двойников и цифровой нити. Цифровые двойники используются для реплики оборудования и процессов, а цифровая нить обеспечивает связность двойника с PLM/ERP/QMS-системами. Цифровые двойники в АП активно применяются для мониторинга, предсказания дефектов и адаптивного управления (Ben Amor et al., 2024).

- Машинное обучение и управление на основе данных. С 2018 г. машинное обучение стало шире применяться для предсказания формы плавления, дефектов, оптимизации параметров и суррогатного моделирования. Появляются обзоры, суммирующие применение классификации, регрессии, генеративных моделей и Bayesian/BO-методов в АП (Vashishtha et al., 2025; Snilders et al., 2020).

– Встраивание в циклы «в реальном времени» (closed-loop control). Растет практическая реализация систем, где цифровые двойники в сочетании с машинным обучением обеспечивают корректирующие воздействия в процессе (Nefedova, 2025).

– MLOps/ModelOps для промышленного цикла. Появление требований к инфраструктуре – ключевой практический тренд для промышленной применимости машинного обучения в АП (Vashishtha et al., 2025).

– Онтологии и стандартизация семантики. Инициативы вроде Industrial Ontologies Foundry (IOF) и работы по унифицированным онтологиям для производства направлены на решение проблем семантической интероперабельности, что критично для цифровой нити. Параллельно развиваются усилия по стандартизации форматов передачи геометрии/процессов (STEP-NC и др.) [tsapps.nist.gov].

– Безопасность и прослеживаемость данных. При многопартнерских цепочках поставки и в ответственных отраслях растет внимание к гарантиям происхождения и неизменности записей цифровой нити [MDPI].

– В работе проведен обзор ключевых публикаций (за 2018–2025 гг.) как в мировых, так и в российских источниках, касающихся цифровой нити, онтологий и машинного обучения в АП. Отдельно следует обратить внимание на следующие направления и работы:

– Xiao et al., 2024: обзор цифровой нити АП с точки зрения обмена данными и извлечения знаний. Авторы отмечают роль стандартов STEP-NC и онтологии для обеспечения интероперабельности и получения знаний в АП.

– Ko et al., 2021: предложен подход к построению правил проектирования АП на основе машинного обучения и онтологий (knowledge graph). Применен метод классификации (дерева решений) для получения данных по влиянию параметров лазерного селективного спекания на качество изготовленных изделий. В рамках этой методики машинное обучение извлекает новые знания о процессах печати, а онтология служит базой знаний для хранения как априорных, так и только что обнаруженных фактов.

– Kim et al., 2023: разработана онтология DfAM для АП методом послойного экструдирования. Онтология аккумулирует метаданные о материалах, процессах и геометрии, что позволяет автоматически подбирать оптимальные параметры и оборудование для заданных условий производства. Работа подчеркивает необходимость централизованного хранилища знаний экспертов для повторного использования опыта.

– Trovato et al., 2025: критический обзор использования ML в DfAM. Авторы показывают, что уже сегодня ML-инструменты активно применяются на разных стадиях конструирования – от определения параметров печати до управления процессом. Отмечено, что ML позволяет ускорять настройку многопараметрических задач проектирования (Trovato et al., 2025) и выступает вспомогательным средством для инжиниринга в АП.

Кроме того, рассмотрена русскоязычная литература по онтологиям АП (например, работы Дозорцева В.М., 2022; Финогеев Д.Ю. и др., 2020), где предлагаются ансамбли онтологических моделей для поддержки лазерного АП (описываются онтологии оборудования, материалов, технологических операций). Эти исследования подтверждают актуальность разработки формальных моделей знаний в АП.

Отдельные аспекты влияния автоматизации на эффективность АП описаны в более ранних работах автора (Nefedova, 2025; Ласкин и др., 2025; Нефедова и др., 2019).

### 3. Материалы и методы

Методологической основой настоящей работы является архитектурный подход к проектированию систем ИТ-поддержки процессов и систем (подходы консорциума The Open Group; Pin et al., 2021; Ильин и др., 2012; Козин и др., 2016). В частности, за основу была взята концепция цифровой нити как основополагающего звена архитектуры киберфизических систем, ярким примером которых является АП (Nefedova L., 2025) и идея цикла Monitor – Analyse – Plan – Execute – Knowledge (MAPE-K).

Термин «цифровая нить» обозначает сквозную информационную линию, которая связывает все артефакты жизненного цикла продукта (требования, CAD/CAE-модели, технологические рецепты, данные качества, эксплуатационные данные) и обеспечивает целостность «источника истины» для принятия решений и автоматизации процессов. Современные обзоры подчеркивают, что цифровая нить – это не просто набор форматов, а масштабируемая архитектура интеграции моделей и потоков данных, предназначенная для устранения информационных пробелов во всем PLM/ALM/IoT-ландшафте. Практически цифровая нить появилась как идея в оборонных проектах (DoD/USAF), где требовалась прослеживаемость от CAD до конечного изделия, и с тех пор ее содержание и практики быстро эволюционируют.

Концепция MAPE-K из области автономных вычислений (Kerhart & Chess, 2003) дает абстрактную архитектуру для систем самоадаптации и теперь широко применяется как модель референтного цикла для цифровых двойников и систем адаптивного управления в промышленности. MAPE-K задает контролируемую петлю: сенсоры → аналитика и детекция отклонений → план корректирующих действий → исполнение → база знаний (обновляемая модель). (Arcaini et al., 2015; Ben Halima et al., 2023; Zhang et al., 2024). Для АП это естественный каркас для реализации замкнутого цикла качества и адаптации технологических параметров.

В практическом воплощении для АП MAPE-K интегрируется с цифровой нитью так:

- Monitor: сбор мульти-сенсорных потоков (камеры, термопары, датчики мощности) и метаданных машин;
- Analyse: ML/физические модели для детекции аномалий, предсказания дефектов;
- Plan: оптимизатор/контроллер формирует корректировки параметров;
- Execute: система управления контролирует исполнение корректировок на печатной машине;
- Knowledge: результаты экспериментов и верификации обновляют онтологию/базу цифровой нити.

Важно подчеркнуть, что описанная интеграция цифровой нити и цикла MAPE-K распространяется не только на контур оперативного мониторинга и управления процессом печати, но и на этап проектирования изделия и технологической подготовки производства. В контексте интеллектуальной поддержки проектирования этап Knowledge аккумулирует не только эксплуатационные данные, но и параметры ранее реализованных конструктивных и

технологических решений, формируя основу для повторного использования знаний и семантического поиска инженерных шаблонов. Этапы Analyse и Plan в этом случае реализуются как процедуры оценки проектных альтернатив, выбора технологических маршрутов и параметрической оптимизации до запуска в производство. Таким образом, цифровая нить в сочетании с MARE-K образует архитектурную основу не только для адаптивного управления производственным процессом, но и для интеллектуализации стадии проектирования, обеспечивая замкнутую обратную связь между разработкой изделия, моделированием и фактическими результатами его изготовления.

Представленный архитектурный каркас цифровой нити и цикла MARE-K носит референтный характер и используется в настоящем исследовании как концептуальная основа для дальнейшей формализации. Он задает структурную логику взаимосвязи данных, моделей и управляющих воздействий, но не привязан к конкретным программным платформам или технологическим реализациям.

#### 4. Результаты

По мотивам идеи цикла MARE-K была предложена модель цифровой нити АП (рис. 1).

Более детальный алгоритм работы цифровой нити поддержки АП (рис. 1) описан ниже. Важно подчеркнуть, что основным предметом настоящей статьи является этап «Поиск и подбор фрагментов», связанный с задачей семантического вывода по онтологическому графу и формированием множества релевантных инженерных шаблонов. Описание остальных этапов цифровой нити приведено в укрупненном виде с целью задать контекст функционирования системы в целом и показать место этапа поиска в замкнутом цикле проектирования и производства. Детализация алгоритмических процедур последующих модулей выходит за рамки настоящей работы и рассматривается как часть общей референтной архитектуры.

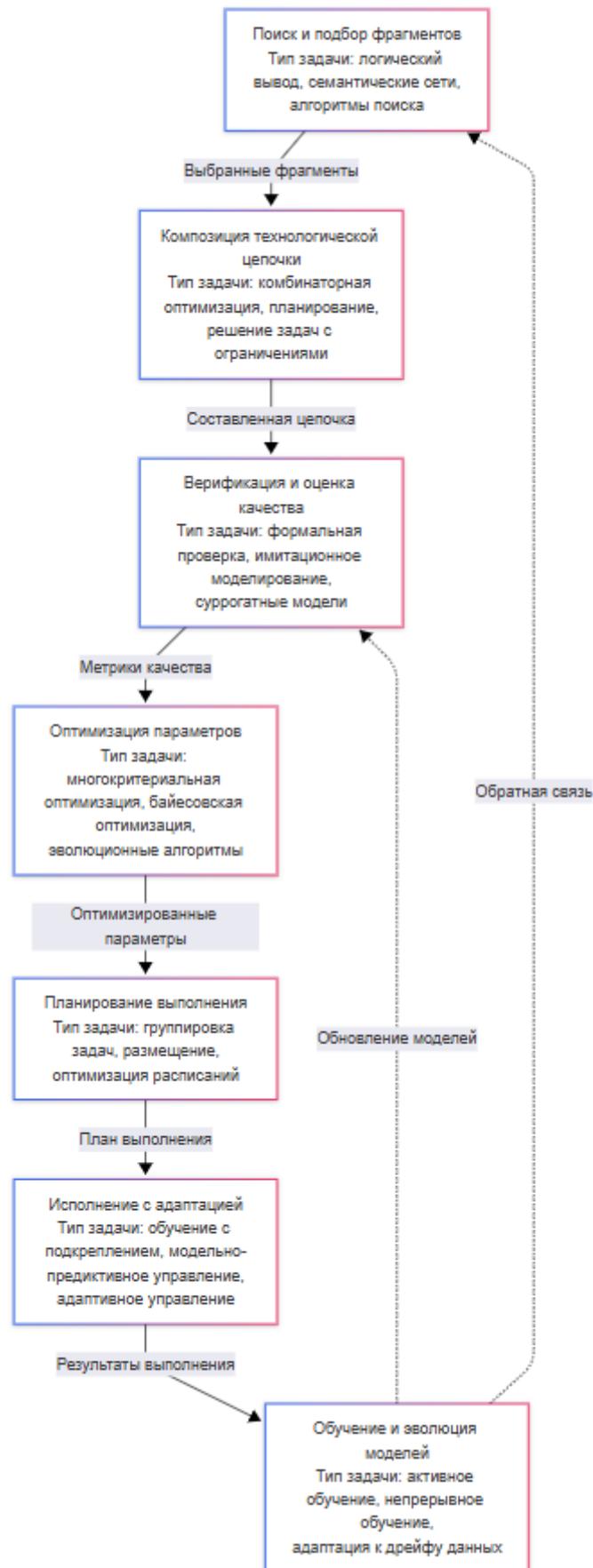


Рисунок 1. Модель цифровой нити аддитивного производства

**Поиск и подбор фрагментов:** по заданным требованиям проектирования выполняется логический запрос к онтологии (семантические сети). В качестве примера можно формализовать запрос SPARQL, извлекающий в базе ранее разработанные конструкции и принципы проектирования, удовлетворяющие новым условиям (Dinar & Rosen, 2017). Этот этап сводится к задаче вывода по графу знаний (семантического поиска).

**Композиция технологической цепочки:** найденные фрагменты комбинируются и собираются в единый производственный процесс. Это задача комбинаторной оптимизации и планирования: нужно расположить модули в правильной последовательности, учесть ограничения на ресурсы и совместимость. Например, если найдены готовые конструкции двух частей, система должна решить, как их соединить с учетом дизайна изделия. Выбор допустимой последовательности модулей осуществляется на основе совокупности критериев и ограничений, включающих: технологическую совместимость операций (материал, тип процесса, допустимые режимы), ресурсные ограничения (доступность оборудования и инструмента), временные ограничения (предельная длительность производственного цикла), экономические показатели (стоимость операций и переходов), а также требования к качественным характеристикам изделия. Формально задача композиции может быть представлена как задача поиска допустимого пути в ориентированном графе операций с ограничениями на вершины и ребра, где решение должно удовлетворять множеству жестких и мягких условий.

**Верификация и оценка качества:** на этом этапе производится анализ смоделированной сборки. На этапе верификации разграничиваются три типа процедур. Формальная проверка используется для контроля логической корректности конструкции и соблюдения технологических ограничений (геометрические допуски, минимальная толщина, совместимость материалов). Имитационное моделирование применяется для оценки физических характеристик изделия (прочность, деформации, температурные поля) на основе численных моделей. Суррогатные модели используются на этапе быстрой оценки, когда требуется оперативное прогнозирование показателей качества без проведения ресурсоемких расчетов. Выходными показателями этапа являются прогнозируемые значения ключевых метрик (масса, прочность, вероятность дефектов), а также индикаторы неопределенности. Если изделие не удовлетворяет критериям, алгоритм возвращается к предыдущим шагам.

**Оптимизация параметров:** когда структура изделия определена, проводится оптимизация технологических параметров (скорость печати, температура и т.д.) и геометрических параметров (толщина стенок, ориентация на платформе). Это многокритериальная задача: применяются эволюционные алгоритмы, байесовская оптимизация или методы многокритериальной оптимизации для достижения баланса между стоимостью, скоростью и качеством. В рамках предлагаемой модели оптимизация имеет иерархическую структуру. На первом уровне оптимизируются геометрические параметры изделия (ориентация, толщина стенок, структура заполнения), влияющие на физические характеристики. На втором уровне оптимизируются технологические параметры процесса (скорость сканирования, мощность лазера, шаг слоя), определяющие качество печати и вероятность дефектов. Совместная оптимизация применяется в случае тесной взаимозависимости параметров, однако в большинстве сценариев используется декомпозиционный подход, позволяющий снизить вычислительную сложность задачи.

**Планирование выполнения:** после окончательного проектирования формируются расписание задач и распределение ресурсов. Задача планирования учитывает группировку печатных заданий, загрузку машин, последовательность операций – классическая задача оптимизации расписаний.

**Исполнение с адаптацией:** начинается процесс печати. При необходимости система действует адаптивное управление и машинное обучение (например, обучение с подкреплением) для корректировки параметров в режиме реального времени на основе отклонений процесса. В рамках предложенной архитектуры адаптивное управление рассматривается как расширенный (но концептуально встроенный) элемент цифровой нити. Базовая реализация системы может функционировать в режиме офлайн-оптимизации без динамической корректировки параметров в процессе печати. Однако для высокоточных изделий адаптивный контур является рекомендуемым компонентом, обеспечивающим замыкание цикла MARE-K и переход от статического планирования к самоадаптирующейся кибер-физической системе. Таким образом, адаптивный модуль не является обязательным для минимальной конфигурации, но представляет собой целевой уровень зрелости архитектуры.

**Обучение и эволюция модели:** накапливаются новые данные о проделанных печатных заданиях. Система использует активное и непрерывное обучение для обновления моделей качества и расширения онтологии: новые конструкции и зависимости автоматически добавляются в базу. Согласно (Dinar & Rosen, 2017), в будущем возможны индукция новых правил и классификация «успешных» и «неуспешных» шаблонов проектирования (Trovato et al., 2025).

Возврат к предыдущим этапам инициируется при нарушении заданных критериев допустимости, таких как превышение пороговых значений дефектности, недостижение требуемых прочностных характеристик, превышение стоимости или времени изготовления. В зависимости от типа несоответствия алгоритм возвращается либо к этапу оптимизации параметров (если структура изделия допустима, но параметры требуют корректировки), либо к этапу композиции технологической цепочки (если выявлена структурная несовместимость или системная ошибка проектного решения). Таким образом, цифровая нить реализует управляемый итерационный процесс с различными точками возврата.

В предложенной модели этап поиска и подбора фрагментов является стартовым для других компонентов цифровой нити. Используя онтологию и накопленную базу решений, система переиспользует фрагменты знаний и объединяет их в технологическую цепочку изготовления, далее проверяет и оптимизирует ее параметры. Внедрение технологий интеллектуального поиска на эту стадию создает предпосылки для ускорения всего процесса АП. Под «фрагментом знаний» в алгоритмическом описании понимается формализованная сущность онтологического графа (шаблон, конструктивный принцип, технологический модуль), которая в математической модели представлена как элемент  $f_i$ . Для обеспечения гибридного поиска каждому фрагменту сопоставляется векторное представление, полученное функцией эмбединга. Таким образом, логический поиск по онтологии и ANN-поиск по эмбедингам являются двумя способами работы с одной и той же совокупностью фрагментов, представленными в символическом и векторном пространствах соответственно.

Ниже описан алгоритм реализации этапа «Поиск и подбор фрагментов» и соответствующее математическое обеспечение для описания ключевых зависимостей и вычисления

ключевых параметров данного этапа. Следует пояснить, что описан обобщенный алгоритм. Его конкретизация и детализация – это вопрос адаптации под конкретную задачу АП.

В предлагаемой модели используется гибридная схема поиска: онтологический граф обеспечивает выполнение строгих семантических ограничений и логический вывод (через SPARQL-запросы и правила совместимости), тогда как векторное пространство эмбеддингов реализует поиск по смысловой близости и обобщение ранее наблюдаемых решений. Итоговый набор кандидатов формируется как объединение или пересечение результатов символического и векторного поиска с последующей агрегацией рангов. Такой подход позволяет сочетать интерпретируемость онтологий с масштабируемостью и устойчивостью ANN-механизмов.

### Постановка задачи и обозначения

По входной спецификации задачи  $q$  (требования, ограничения и т.п.) найти в репозитории цифровой нити  $F = \{f_1, \dots, f_N\}$  набор кандидатов  $SCF$  (обычно  $|S| \leq K$ ), пригодных для последующей композиции и верификации, и выдать для каждого  $f_i$  оценку релевантности  $s_i$  и меру неопределенности  $\sigma_i$ . При выборе учитывать жесткие ограничения совместимости и желать разнообразия кандидатов.

Ключевые обозначения:

- $q$  – входной запрос/спецификация (структурированный вектор и/или текст);
- $F = \{f_1, \dots, f_N\}$  – репозиторий фрагментов;
- Для каждого фрагмента  $f_i$ :  $a_i$  – вектор атрибутов;  $t_i$  – текстовое описание;  $o_i$  – онтологические метки;  $m_i$  – метрики прошлой успешности;
- $v_q, v_i$  – эмбеддинги запроса и фрагмента соответственно;
- $\text{sim}(v_q, v_i)$  – мера похожести (например, косинус);
- $s_i$  – итоговый скор релевантности фрагмента  $f_i$ ;
- $\sigma_i$  – оценка неопределенности в  $s_i$ ;
- $C(\cdot)$  – система жестких ограничений.
- $K$  – требуемое число выдаваемых кандидатов.

Цель формально можно записать как оптимизационную задачу:

$$E[U(q)], \quad C(q) = 0,$$

где  $U(\cdot)$  – польза набора для дальнейшей композиции.

Этап «Поиск и подбор фрагментов» включает в себя последовательную реализацию следующих шагов:

#### 1. Предварительная фильтрация

Идея: исключить очевидно несоответствующие фрагменты, сократить размер поисковой базы для последующих этапов.

*Операции:*

1) Булевы фильтры: например, требование наличия сертификата, разрешенного материала, максимальных размеров:

$$F_0 = \{f_i \in F | B_j(f_i, q) = 1 \quad \forall j \in J\},$$

где  $B_j$  – булевы предикаты жестких ограничений (например,  $B_{material}(f_i, q) = 1$ , если материал фрагмента совместим с требованием запроса).

2) Атрибутивная фильтрация (диапазонные проверки):

$$F_1 = \{f_i \in F_0 | a_i^k \in [L_k(q), U_k(q)] \quad \forall k \in K\},$$

где  $a_i^k$  –  $k$ -я числовая характеристика,  $L_k, U_k$  – допустимые границы, задаваемые  $q$ .

Результат:  $F_{cand}^{(0)} = F_1$ .

### **2. Поиск с использованием приближенных ближайших соседей (ANN-поиск)**

Идея: поиск ближайших по семантике фрагментов с помощью эмбедингов; применяется приближенный поиск для скорости.

Представления:

$$v_q = \Phi(q), v_i = \Psi(t_i, a_i, o_i),$$

где  $\Phi, \Psi$  – функторы преобразования текста/атрибутов/графов знаний (KG) в векторы. Итоговый вектор  $v_i$  можно строить как конкатенацию:  $v_i = [v_i^{attr}, v_i^{text}, v_i^{kg}]$ .

ANN-поиск:

$$F_{cand}^{(1)} = ANN_{kNN}(\{v_i | f_i \in F_{cand}^{(0)}\}, v_q, k_{ANN}),$$

где  $k_{ANN}$  – размер предварительного пула (обычно  $100 \leq k_{ANN} \leq 1000$ ),  $ANN_{kNN}$  возвращает  $k_{ANN}$  элементов с наибольшей схожестью  $sim(v_q, v_i)$ .

Мера схожести: косинусная схожесть:

$$sim(v_q, v_i) = \frac{(v_q \cdot v_i)}{\|v_q\| \|v_i\|}.$$

### **3. Вычисление признаков**

Идея: для каждого кандидата  $f_i \in F_{cand}^{(1)}$  вычислить вектор признаков  $\varphi(q, f_i)$ , который затем подается на модель ранжирования.

Примеры признаков  $\varphi$ :

$p_1 = sim(v_q, v_i)$  – косинусная схожесть эмбедингов;

$p_2 = BP25(q, t_i)$  – BP25 – оценка текстового совпадения (нормированная);

$p_3 = 1[ontomatch]$  – булево совпадение по обязательным онтологическим критериям (например, требуемый класс присутствует у  $f_i$ );

$p_4 = m_i^{usage}$  – историческая частота использования;

$p_5 = m_i^{success}$  – историческая частота успешных применений валидированных кейсов;

$p_6 = age(f_i)$  – возраст версии, время с последней ревизии (негативно коррелирует);

$p_7 = compatibility\_score(f_i, q)$  – мягкая мера совместимости (0,...,1);

$p_8 = certified_i$  – флаг сертификации.

Итог:  $\varphi_i = \varphi(q, f_i) = [p_1, \dots, p_d]$

#### 4. Переранжирование (повторная сортировка кандидатов)

Идея. На основе  $\varphi_i$  получить скалярный скор  $s_i$  и вероятность релевантности  $P(rel|q, f_i)$ .

Варианты моделей:

1. Логистическая модель:

$$P_i = P(q, f_i) = \sigma(\theta^T \varphi_i) = \frac{1}{1 + e^{-\theta^T \varphi_i}}$$

тогда  $s_i = \log \frac{P_i}{1-P_i}$  или просто  $s_i = P_i$ .

2. Обучение ранжированию (Learning-to-rank, LTR): используются алгоритмы типа LambdaMART, RankNet, ListNet и т.п., обучаемые на парных/списковых релеванностях. Модель дает ранжированный список и скоры  $s_i$ .

3. Калибровка и неопределенность: получить калиброванный  $P_i$  и оценочную  $\sigma_i$  (например, через bootstrap или Bayesian Logistic Regression, где  $\theta$  – случайная величина и  $Var[P_i]$  вычисляется по апостериорному распределению).

#### 5. Проверка ограничений

Идея: применить формальные проверки совместимости и ресурсных ограничений; это может быть представлено как ILP/CSP.

Вводятся бинарные переменные  $x_i \in \{0,1\}$ :  $x_i = 1$ , если фрагмент выбран.

Жесткие ограничения могут быть записаны как:

$$\sum_i r_i^{(k)} \cdot x_i \leq R^{(k)}, \quad \forall k \in K_{resources},$$

где  $r_i^{(k)}$  – потребление ресурса  $k$  при применении  $f_i$ ,  $R^{(k)}$  – доступный ресурс.

Совместимость можно задать выражением:

$x_i + x_j \leq 1$ , если  $f_i$  и  $f_j$  совместимы.

Требование сертификации можно задать:

$$x_i \leq certified_i.$$

Целевая функция – максимизация суммарного сора при ограничениях:

$$\sum_i s_i \cdot x_i, \quad A \cdot x \leq b.$$

### 6. Выбор с учетом разнообразия (оптимизация неповторяемости)

Идея: Топ-К по скору может быть тесно коррелированным (много «почти одинаковых» фрагментов). Требуется выбрать  $S$  с хорошим балансом между релевантностью и разнообразием.

Функция цели с штрафом за схожесть может быть представлена в виде:

$$F(S) = \sum_{i \in S} s_i - \eta \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j \neq i} sim(v_q, v_i), \quad A \cdot x \leq b,$$

где  $\eta \geq 0$  – коэффициент штрафа за двойной учет схожести,  $sim(v_q, v_i)$  – мера близости фрагментов.

### 7. Результирующий набор фрагментов (выход)

Каждый элемент в итоговой выдаче  $S$  содержит:

- идентификатор фрагмента  $id_i$ ;
- оценка  $s_i$  и вероятность  $P_i$ ;
- оценку неопределенности  $\sigma_i$ ;
- краткое объяснение (explain): вклад признаков  $\varphi_i$  в  $s_i$ ;
- метку совместимости (булевы метки), параметры прослеживаемости (*provenance* – версия, автор, время);
- рекомендованные параметры (если  $f_i$  содержит шаблон) и предполагаемый риск.

Формальное представление выхода:

$$Output = \{(f_i, s_i, P_i, \sigma_i, explain_i, provenance_i) | i \in S\}.$$

Выходной набор *Output* представляет собой структурированное множество фрагментов с метаданными (тип операции, входные/выходные параметры, ограничения совместимости), которое передается на этап композиции как множество допустимых вершин графа технологических модулей. На следующем этапе данные фрагменты интерпретируются как элементы ориентированного графа операций, из которого формируются допустимые маршруты с учетом зависимостей и ограничений. Тем самым обеспечивается формальная непрерывность между этапом поиска и этапом композиции технологической цепочки.

## 5. Обсуждение

Рассмотренный подход сочетает преимущества онтологической модели и методов машинного обучения. С одной стороны, онтология задает структурированное хранилище знаний: она формализует накопленный опыт проектирования АП и позволяет логически выводить релевантные решения. С другой стороны, машинное обучение добавляет «априори неизвестное» – извлечение новых закономерностей из данных процесса и адаптацию моделей под новые условия. Это подтверждают авторы (Ko et al., 2021): их фреймворк ML + граф знаний аккумулирует как априорные, так и только что извлеченные данные, а затем логически обрабатывает

их для генерации практических правил проектирования. Такая гибридность дает синергетический эффект: например, алгоритмы активного обучения могут автоматически дополнять онтологию новыми правилами и зависимостями (Dinar & Rosen, 2017; Ko et al., 2021).

Применение описанного подхода дает несколько существенных преимуществ:

– Экономия времени: автоматизированный поиск и переиспользование готовых фрагментов сокращает цикл проектирования; кроме того, ML-методы значительно ускоряют подбор сложных многопараметрических решений (Trovato et al., 2025).

– Повышение качества и надежности: применение DfAM-инструментов (в том числе семантических) снижает риск брака 3D-печатных изделий – как отмечено, использование методов DfAM уменьшает вероятность дефектов и отклонений (Trovato et al., 2025).

– Рост коэффициента повторного использования: хранилище знаний на основе онтологии обеспечивает повторное использование экспертных разработок и стандартных решений. Это уменьшает дублирование труда и дает выигрыш по цене из-за сокращения повторных конструирований (Kim et al., 2023). В сумме комбинированный подход приводит к снижению затрат на подготовку производства и повышению точности выпуска продукции.

Однако существуют и ограничения. Во-первых, развитие онтологии требует значительных усилий: сбор, разметка и экспертиза знаний – ресурсоемкая задача. Отсутствие единых стандартов данных для АП (хотя STEP-NC и OntoSTEP развиваются) затрудняет интеграцию разнородной информации. Во-вторых, цифровая нить и ML-инфраструктура требуют вложений: как отмечается в литературе, высокая стоимость технологий АП и их комплексности замедляет широкое внедрение (Trovato et al., 2025). Также накладно поддерживать актуальность модели – быстро меняющиеся материалы и процессы требуют постоянного обновления онтологии и переобучения ML-моделей.

Возможности дальнейших исследований включают автоматизацию обновления базы знаний (например, через онтологическое обучение), интеграцию цифровой нити с системами цифровых двойников, стандартизацию форматов данных для АП. Кроме того, перспективно использовать глубинное обучение для извлечения сложных паттернов дефектов и оптимизационных ландшафтов, а затем кодировать их в онтологию. Кооперация ML-подходов и онтологической инженерии, как показали работы (Ko et al., 2021; Dinar & Rosen, 2017), способна дать новые инструменты для DfAM – например, автоматически формировать и верифицировать дизайн-правила.

## 6. Заключение

В статье сформулирована и обоснована гипотеза о том, что эффективная цифровая нить на основе онтологии и ML может сократить этап проектирования в АП. В «Введении» мы подчеркнули особенности АП (сложные геометрии, расширенные возможности) и определили проектирование как узкое место. В результате обзора литературы (раздел «Методы») показано, что современные исследования активно развивают онтологии DfAM и ML-методы оптимизации. Модель цифровой нити (раздел «Результаты») описана структурно: она использует базу знаний (онтологию) на этапе поиска фрагментов, комбинирует их в технологическую цепочку, проводит верификацию и оптимизацию параметров. Для каждого шага предложены математические подходы (семантический поиск, комбинаторная оптимизация,

многокритериальные алгоритмы, планирование, контроль с адаптацией). Анализ показал, что такой подход теоретически дает выигрыш по времени и качеству изготовления.

Таким образом, поставленные во «Введении» задачи сформулировать эффективный алгоритм цифровой нити и оценить его преимущества реализованы на концептуальном уровне. Цифровая нить – фундаментальный элемент цифровой трансформации в АП: она обеспечивает связность данных/моделей на всем жизненном цикле и является предисловием для успешной интеграции цифрового двойника и машинного обучения в данную сферу. Цикл МАРЕ-К остается удобной архитектурной референцией для построения замкнутых адаптивных систем в АП. Его адаптация – модифицированный цикл, предложенный в настоящей статье – логически вытекает из потребности добавить этапы поиска и управления знаниями и инкрементальную эволюцию моделей. Для практического подтверждения необходимо дальнейшее экспериментальное исследование, включая создание реальной онтологии АП и ее интеграцию с ML-системой. Однако уже на этапе моделирования можно убедиться в реализуемости предложенной идеи: сочетание формализованного знания (онтологии) и извлекаемых из данных закономерностей (ML) обещает значительное упрощение проектирования изделий для 3D-печати.

### Список литературы

- Abdel-Aty, T.A., Negri, E., 2024. Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing* 35, 3629–3653. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02407-1>
- Arcaini, P., Riccobene, E., Scandurra, P., 2015. Modeling and Analyzing MAPE-K Feedback Loops for Self-Adaptation, in: 2015 IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. Florence, pp. 13–23. <https://doi.org/10.1109/SEAMS.2015.10>
- Ben Amor, S., Elloumi, N., Eltaief, A., Louhichi, B., Alrasheedi, N.H., Seibi, A., 2024. Digital Twin Implementation in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Processes* 12 (6), 1062. <https://doi.org/10.3390/pr12061062>
- Ben Halima, R., Hachicha, M., Jemal, A., Hadj Kacem, A., 2023. MAPE-K patterns for self-adaptation in cyber-physical systems. *The Journal of Supercomputing* 79, 4917–4943. <https://doi.org/10.1007/s11227-022-04828-2>
- Dinar, M., Rosen, D., 2017. A Design for Additive Manufacturing Ontology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 17 (2), 021013. <https://doi.org/10.1115/1.4035787>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, Ch., Smith, B., Jones, A., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Ilin, I., Levaniuk, D., Dubgorn, A., 2021. Assessment of Digital Maturity of Enterprises, in: Murgul, V., Pukhkal, V. (eds.) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. Springer, Cham, pp. 167–177. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_14)
- Kephart, J.O., Chess, D.M., 2003. The Vision of Autonomic Computing. *Computer* 36 (1), 41–50. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055>
- Kim, S., Park, H., Park, Si., 2023. Design for additive manufacturing knowledgebase development and its application for material extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37, 6193–6203. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2412-3>
- Ko, H., Witherell, P., Lu, Y., Kim, S., Rosen, D.W., 2021. Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 37, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101620>
- Nefedova, L., 2025. Modelling the Effect of Additive Technologies: Logistic Aspect, in: Ilin, I., Youzhong, M. (eds.) *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector*. Springer, Cham, pp. 139–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7_11)
- Snijders, R., Pileggi, P., Broekhuijsen, J., Verriet, J., Wiering, M., Kok, K., 2020. Machine Learning for Digital Twins to Predict Responsiveness of Cyber-Physical Energy Systems, in: *2020 8th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems*. Sydney, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/mscpes49613.2020.9133695>
- Trovato, M., Belluomo, L., Bici, M., Prist, M., Campana, F., Cicconi, P., 2025. Machine learning in design for additive manufacturing: A state-of-the-art discussion for a support tool in product design lifecycle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 137, 2157–2180. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15273-9>
- Vashishtha, G., Chauhan, S., Zimroz, R., Yadav, N., Kumar, R., Gupta, M.K., 2025. Current Applications of Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review on Challenges and Future Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering* 32, 2635–2668. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10215-2>
- Xiao, J., Anwer, N., Huang, H., Bonnard, R., Eynard, B., Huang, C., Pei, E., 2024. Information exchange and knowledge discovery for additive manufacturing digital thread: a comprehensive literature review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 38 (8), 1052–1077. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2387768>
- Zhang, Q., Liu, J., Chen, X., 2024. A Literature Review of the Digital Thread: Definition, Key Technologies, and Applications. *Systems* 12 (3), 70. <https://doi.org/10.3390/systems12030070>
- Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленной автоматизации – на пике моды или наступившее будущее? // *Автоматизация в промышленности*. 2022. № 7. С. 3–14. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2022.07.01>
- Ильин И.В., Широкова С.В., Эссер М. Управление проектами. Основы теории, методы, управление проектами в области информационных технологий. СПб.: Санкт-Петербургский Государственный Педагогический Университет, 2012.

- Козин Е.Г., Ильин И.В., Лёвина А.И. Сервис-ориентированный подход к анализу архитектурных решений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2016. № 4 (246). С. 162–172. <https://doi.org/10.5862/JE.246.14>
- Ласкин М.Б., Нефёдова Л.А., Ильин И.В., Левина А.И. Оценка экономической эффективности аддитивного производства // Глобальный научный потенциал. 2025. № 7 (172). С. 421–426.
- Нефёдова Л.А., Лёвина А.И., Лепехин А.А. Цифровая трансформация предприятий с учётом автоматизации технологических процессов аддитивного производства // Экономика и предпринимательство. 2019. № 1 (102). С. 1206–1208.
- Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 63–71.

## References

- Abdel-Aty, T.A., Negri, E., 2024. Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing* 35, 3629–3653. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02407-1>
- Arcaini, P., Riccobene, E., Scandurra, P., 2015. Modeling and Analyzing MAPE-K Feedback Loops for Self-Adaptation, in: 2015 IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. Florence, pp. 13–23, <https://doi.org/10.1109/SEAMS.2015.10>
- Ben Amor, S., Elloumi, N., Eltaief, A., Louhichi, B., Alrasheedi, N. H., & Seibi, A., 2024. Digital Twin Implementation in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Processes* 12 (6), 1062. <https://doi.org/10.3390/pr12061062>
- Ben Halima, R., Hachicha, M., Jemal, A., Hadj Kacem, A., 2023. MAPE-K patterns for self-adaptation in cyber-physical systems. *The Journal of Supercomputing* 79, 4917–4943. <https://doi.org/10.1007/s11227-022-04828-2>
- Dinar M., Rosen D., 2017. A Design for Additive Manufacturing Ontology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 17 (2), 021013. <https://doi.org/10.1115/1.4035787>
- Dozortsev, V.M., 2022. Tsifrovyye dvoyniki v promyshlennoy avtomatizatsii – na pike mody ili nastupivshye budushcheye? [Digital Twins in Industrial Automation – Latest Trend or the Future?]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry]* 7, 3–14. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2022.07.01>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, Ch., Smith, B., Jones, A., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Finogeev, D.Yu., Reshetnikova, O.P., 2020. Additive Technologies in Modern Production of Precision Machine Building Parts. *Vestnik Saratov State Technical University* 3 (86), 63–71.
- Ilin, I., Levaniuk, D., Dubgorn, A., 2021. Assessment of Digital Maturity of Enterprises, in: Murgul, V., Pukhkal, V. (eds.) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. Springer, Cham, pp. 167–177. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_14)
- Ilin, I.V., Shirokova, S.V., Esser, M., 2012. *Upravleniye proyektami. Osnovy teorii, metody, upravleniye proyektami v oblasti informatsionnykh tekhnologiy [Project Management. Fundamentals of Theory, Methods, and Project Management in Information Technology]*. St. Petersburg State Pedagogical University, St. Petersburg.
- Kephart J.O., Chess D.M., 2003. The Vision of Autonomic Computing. *Computer* 36 (1), 41–50. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055>
- Kim, S., Park, H., Park, Si., 2023. Design for additive manufacturing knowledgebase development and its application for material extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37, 6193–6203. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2412-3>
- Ko, H., Witherell, P., Lu, Y., Kim, S., Rosen, D.W., 2021. Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 37, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101620>
- Kozin, E.G., Ilyin, I.V., Levina, A.I., 2016. Service-Oriented Approach for Architecture Solutions Analysis. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics* 4 (246), 162–172. <https://doi.org/10.5862/JE.246.14>
- Laskin, M.B., Nefedova, L.A., Ilyin, I.V., Levina, A.I., 2025. Evaluation of the Economic Efficiency of Additive Manufacturing. *Global Scientific Potential* 7 (172), 421–426.
- Nefedova, L., 2025. Modelling the Effect of Additive Technologies: Logistic Aspect, in: Ilin, I., Youzhong, M. (eds.) *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector*. Springer, Cham, pp. 139–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7_11)
- Nefedova, L.A., Levina, A.I., Lepekhn, A.A., 2019. Digital Transformation of Enterprises in View of the Automation of Technological Processes of Additive Production. *Journal of Economy and Entrepreneurship* 1 (102). С. 1206–1208.
- Trovato, M., Belluomo, L., Bici, M., Prist, M., Campana, F., Cicconi, P., 2025. Machine learning in design for additive manufacturing: A state-of-the-art discussion for a support tool in product design lifecycle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 137, 2157–2180. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15273-9>
- Vashishtha, G., Chauhan, S., Zimroz, R., Yadav, N., Kumar, R., Gupta, M.K., 2025. Current Applications of Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review on Challenges and Future Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering* 32, 2635–2668. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10215-2>
- Xiao, J., Anwer, N., Huang, H., Bonnard, R., Eynard, B., Huang, C., Pei, E., 2024. Information exchange and knowledge discovery for additive manufacturing digital thread: a comprehensive literature review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 38 (8), 1052–1077. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2387768>
- Zhang, Q., Liu, J., Chen, X., 2024. A Literature Review of the Digital Thread: Definition, Key Technologies, and Applications. *Systems* 12 (3), 70. <https://doi.org/10.3390/systems12030070>

Статья поступила в редакцию 25.09.2025, одобрена после рецензирования 09.11.2025, принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 25.09.2025, approved after reviewing 09.11.2025, accepted for publication 26.11.2025.

Информация об авторах:

1. Любовь Нефёдова, канд. техн. наук, без звания, доцент, Научно-исследовательский институт прикладного материаловедения Концерна ВКО «Алмаз – Антей», Санкт-Петербург, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4334-0542>, nefedova@goz.ru

About authors:

1. Lyubov Nefedova, PhD, Research Institute of Applied Materials Science, Almaz-Antey Concern, Saint Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4334-0542>, nefedova@goz.ru